UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

LEONARDO JORGE BRASIL DE FREITAS CUNHA

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA APLICAÇÃO DE VENTILAÇÃO NATURAL EM PROJETOS DE EDIFICAÇÕES EM NATAL-RN

Natal/ RN
2010

LEONARDO JORGE BRASIL DE FREITAS CUNHA

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA APLICAÇÃO DE VENTILAÇÃO NATURAL EM PROJETOS DE EDIFICAÇÕES EM NATAL-RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Aldomar Pedrini, Ph.D.

Natal/ RN

2010

Divisão de Serviços Técnicos

Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Cunha, Leonardo Jorge Brasil de Freitas.
Análise de métodos para aplicação de ventilação natural em projetos de edificações em Natal-RN / Leonardo Jorge Brasil de Freitas Cunha. – Natal, RN, 2010.
140 f.

Orientador: Aldomar Pedrini.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

1. Arquitetura – Dissertação. 2. Ventilação natural – Dissertação. 3. Projeto arquitetônico – Dissertação. 4. Simulação computacional – Dissertação. I. Pedrini, Aldomar. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 72(043.3)

LEONARDO JORGE BRASIL DE FREITAS CUNHA

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA APLICAÇÃO DE VENTILAÇÃO NATURAL PARA PROJETO DE EDIFICAÇÕES EM NATAL-RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Projeto, Morfologia e Conforto no Ambiente Construído.

BANCA EXAMINADORA:

Presidente: ____________________

Prof. Aldomar Pedrini, Ph.D.
PPGAU/UFRN

Examinadora interna: ____________________

Profª. Drª Virgínia Maria Dantas de Araújo.
PPGAU/UFRN

Examinador externo: ____________________

Prof Dr. Leonardo Salazar Bittencourt.
DEHA/UFAL

Ao meu pai

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e orientador Aldomar Pedrini, por ter me mostrado o potencial do Conforto Ambiental e pela dedicação, paciência e amizade nesses cinco anos de convívio e aprendizado.

Aos professores do PPGAU pelos ensinamentos passados, especialmente à Professora Virgínia Araújo pelo constante voto de confiança depositado.

Aos integrantes do LabCon/ UFRN: que compartilharam seus conhecimentos e também momentos de alegria, em especial à Natália Queiroz pela parceria na aprendizagem do CF-x.

Ao CNPq, pelo financiamento dos equipamentos e à CAPES, pela bolsa de estudos disponibilizada para a execução desta pesquisa

RESUMO

A ventilação natural é uma estratégia bioclimática eficaz na promoção do conforto térmico, da salubridade e no arrefecimento da massa edificada. Contudo, a despreocupação com a qualidade ambiental, as incertezas envolvidas no fenômeno e a popularização dos sistemas artificiais de climatização costumam servir de argumento para os que negligenciam os benefícios do condicionamento passivo. As incertezas podem ser reduzidas quando a ventilação é contemplada em todas as etapas de processo projetual, principalmente nas fases iniciais, na qual as decisões têm grande impacto no desempenho da edificação. As ferramentas disponíveis para quantificar o impacto das decisões projetuais consistem basicamente no cálculo da taxa de renovação ou na simulação computacional de fluidos, comumente denominada CFD, sigla em inglês para 'dinâmica computacional de fluidos', ambas com algum distanciamento da prática do projeto e carentes de adaptação para que possam ser utilizadas em estudos paramétricos. Assim, optou-se por verificar, através da simulação computacional, a representatividade dos resultados obtidos com o método de cálculo simplificado da taxa de renovação do ar, bem como torná-lo mais compatível com as questões pertinentes às primeiras fases do processo projetual. O objeto de estudo consiste em um modelo resultante das recomendações do Código de Obras de Natal/ RN, cujas aberturas foram dimensionadas de acordo com a NBR 15220. A pesquisa mostrou a complexidade em agregar uma ferramenta CFD ao processo e a necessidade de um método capaz de gerar dados na mesma velocidade com que as idéias surgem e são descartadas durante o desenvolvimento do projeto. Ao final discute-se as concessões necessárias para a realização das simulações, a aplicabilidade e as limitações tanto das ferramentas utilizadas quanto do método adotado e a representatividade dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Ventilação natural, Projeto arquitetônico, Simulação computacional

ABSTRACT

Natural ventilation is an efficient bioclimatic strategy, one that provides thermal comfort, healthful and cooling to the edification. However, the disregard for quality environment, the uncertainties involved in the phenomenon and the popularization of artificial climate systems are held as an excuse for those who neglect the benefits of passive cooling. The unfamiliarity with the concept may be lessened if ventilation is observed in every step of the project, especially in the initial phase in which decisions bear a great impact in the construction process. The tools available in order to quantify the impact of projected decisions consist basically of the renovation rate calculations or computer simulations of fluids, commonly dubbed CFD, which stands for "Computational Fluid Dynamics", both somewhat apart from the project's execution and unable to adapt for use in parametric studies. Thus, we chose to verify, through computer simulation, the representativeness of the results with a method of simplified air reconditioning rate calculation, as well as making it more compatible with the questions relevant to the first phases of the project's process. The case object consists of a model resulting from the recommendations of the Código de Obras de Natal/ RN, customized according to the NBR 15220. The study has shown the complexity in aggregating a CFD tool to the process and the need for a method capable of generating data at the compatible rate to the flow of ideas and are discarded during the project's development. At the end of our study, we discuss the necessary concessions for the realization of simulations, the applicability and the limitations of both the tools used and the method adopted, as well as the representativeness of the results obtained.

Key words: Natural ventilation, Architectural project, computational simulation

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

A ventilação natural pode reduzir o consumo energético da edificação e proporcionar ambientes salubres e termicamente confortáveis, principalmente em locais de climas quente e úmido como o da cidade do Natal-RN. Apesar das suas muitas vantagens, o desenvolvimento de um projeto arquitetônico com vistas à aplicação da ventilação natural varia quanto à complexidade porque depende de diversas relações entre as características do projeto, do vento e do entorno. Por isso, as decisões arquitetônicas devem ser acertadas desde as primeiras fases do processo projetual. É importante que o projetista disponha de ferramentas de avaliação e análise, compatíveis com a prática projetual, que o assistam a eleger e potencializar as decisões com maior chance de sucesso. As ferramentas normalmente apresentam alguma limitação, seja na aplicabilidade, na abordagem, na utilização ou na incerteza dos resultados. As ferramentas disponíveis podem ser divididas em três categorias: recomendações empíricas, equações e simulação computacional.

As recomendações empíricas caracterizam-se pela abordagem simples e bastante acessível com o objetivo de fornecer informações sobre o comportamento do vento. Estas recomendações são baseadas em estudos experimentais que se tornaram referência, como os de Olgyay (1963), os de Givoni (1969) e os de Evans (2003). Normalmente os resultados dos estudos empíricos consistem em ilustrações esquemáticas e intuitivas, nas quais o fluxo de ar externo e/ou interno é representado por vetores ou linhas de percurso sobre modelos de geometria simplificada. Esse tipo de abordagem tem forte apelo didático e são utilizadas no ensino de graduação em arquitetura. Muitas vezes é a única referência que o arquiteto leva para a prática profissional para auxiliá-lo na tomada de decisões. Contudo, sua utilização como único recurso projetual pode torna-se equivocada para situações complexas, visto que resultam de configurações arquitetônicas simplificadas, além de se desconhecer as incertezas envolvidas. Na tentativa de adaptar as

recomendações para o projeto, o método pode assumir um caráter subjetivo ao depender da sensibilidade do projetista em prever a trajetória do vento.

As equações visam quantificar a renovação do ar, a velocidade interna e calor removido pela ventilação, o que permite avaliar o impacto das decisões projetuais e assim priorizar as variáveis mais influentes. As equações, ou pelo menos algumas de suas incógnitas, são determinadas através de estudos experimentais e, por isto, possuem limitações similares às recomendações empíricas. Contudo, as equações costumam ser negligenciadas pelos arquitetos, por se afastarem do método tradicional de elaboração do projeto.

A simulação computacional de dinâmica dos fluidos (CFD, na sigla em inglês) é um instrumento passível de aplicação nas diversas fases do projeto para auxiliar na predição do desempenho da ventilação da edificação. Porém, é um método que exige elevado conhecimento técnico e experiência do operador para a plena utilização do *software*. Como a maior parte dos programas de CFD é desenvolvida para solucionar problemas de engenharia, principalmente mecânica, seu uso na arquitetura exige adaptações e a representatividade dos resultados é afetada pelas considerações adotadas pelo operador. O custo de aquisição, de operação, o tempo de treinamento e a necessidade de conhecimentos específicos de mecânica dos fluidos também contribuem para a inexistência destes programas nos escritórios de arquitetura convencionais. O uso destes *softwares* acaba se restringindo às universidades, aos centros de pesquisa e, na melhor das hipóteses, são utilizados na consultoria de projetos de grande porte elaborados por equipes multidisciplinares.

Portanto, percebe-se que, apesar de imprescindível, a predição do desempenho da ventilação natural ainda carece de métodos compatíveis com o processo projetual, principalmente ao que se refere à quantificação do impacto das decisões tomadas ainda nas primeiras fases de elaboração do projeto. O objetivo deste trabalho é avaliar, através da simulação computacional, o desempenho da ventilação em modelos simplificados, considerando diferentes combinações de

abertura e orientação, e comparar os resultados com os métodos contidos na literatura direcionada aos projetistas, permitindo avaliar sua eficácia e aplicabilidade.

Após a introdução, o segundo capítulo trata da revisão bibliográfica, que aborda os temas necessários ao desenvolvimento da pesquisa. O capítulo inicia com os conceitos de ventilação natural e sua relação com o conforto térmico, com a qualidade ambiental e com o processo projetual. A seguir são elencados os elementos arquitetônicos capazes de potencializar a ventilação natural e que devem compor o repertório dos projetistas que primam pelo condicionamento passivo. São abordados os métodos de obtenção dos coeficientes de pressão, suas limitações e aplicações. O tópico seguinte trata do dimensionamento dos ambientes e das aberturas de acordo com a Norma Brasileira e o Código de Obras Municipal. Por fim são apresentados os métodos de predição da ventilação natural e, em seguida, são discutidos alguns temas relacionados à simulação computacional.

O terceiro capítulo aborda o processo de desenvolvimento da metodologia utilizada e os ajustes necessários para ajustá-la à pesquisa, principalmente em função das exigências impostas pela simulação computacional. O quarto capítulo apresenta uma proposta de integração da ventilação ao processo projetual, baseada na revisão bibliografia e na discussão com os arquitetos e os demais membros do Grupo de Pesquisa Conforto Ambiental e Eficiência Energética/ UFRN-CNPq. Em seguida são descritas as condições de contorno e a configuração adotada nas simulações computacionais. Por fim são apresentados os resultados das simulações e a comparação com os dados obtidos pelo método simplificado de cálculo.

O sexto capítulo trata das considerações finais sobre os resultados da pesquisa. Discute-se também as limitações do método adotado e a representatividade dos dados obtidos. Após o referencial bibliográfico, são apresentados os anexos com dois quadros-resumos com os dados de coeficiente de pressão nas aberturas de entrada e saída e taxa de renovação das simulações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica busca embasar a metodologia, a análise dos resultados e as considerações finais, abordando temas pertinentes à ventilação natural de maneira sucinta. São abordadas questões referentes à ventilação natural e sua relação com o ambiente construído, os métodos de estimativa, os elementos arquitetônicos que favorecem a ventilação, as recomendações legais que tratam do tema e, por fim as simulações computacionais.

2.1 Ventilação natural

A ventilação natural é a estratégia bioclimática mais recorrente quanto se trata da qualidade do espaço construído no clima quente e úmido, através da renovação do ar e incremento do conforto (Figura 1). A renovação do ar é recomendada para todos os climas por assegurar a higiene e a saúde dos ocupantes e deve ser estimulada quando há pouca área livre para ventilação entre o ambiente interno e o meio externo. O objetivo da renovação é a remoção ou diluição dos gases, dos odores e dos particulados resultantes das atividades humanas e dos equipamentos existentes. Além de melhorar a qualidade ambiental, a captação de ar do meio externo com temperatura inferior ao meio interno favorece as condições de conforto em locais de clima tropical, pois resfria os ocupantes e a massa edificada. O resfriamento da massa edificada é um recurso utilizado, principalmente, em locais de clima árido caracterizado pela grande amplitude térmica, onde se permite que o vento frio noturno adentre os ambientes, mas barra-se o vento quente diurno. Esta estratégia, aliada a elevada inércia térmica da envoltória, favorece a formação de um microclima interno mais ameno em relação ao externo.

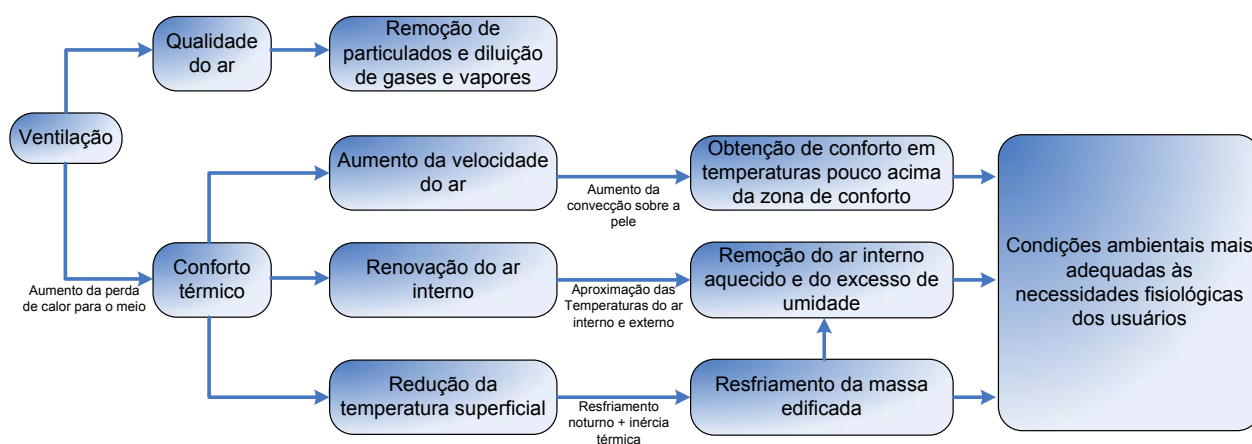



Figura 1 – Fluxograma das funções da ventilação natural.

Além da remoção do calor resultante da renovação, o movimento do ar ao redor do indivíduo influencia a sensação de conforto, pois facilita a perda de calor para o meio[1] por convecção e favorece a evaporação do suor. Este efeito convectivo é bastante benéfico no clima quente e úmido onde a evaporação do suor é dificultada em razão da umidade do ar em níveis elevados que tende a acontecer com frequência. A eficácia do fenômeno é proporcional à velocidade do ar e a diferença de temperatura entre o ar e a pele. Assim, ao permitir o fluxo de ar constante entre os ambientes através da ventilação cruzada é possível proporcionar condições satisfatórias aos usuários em locais onde a temperatura externa fica pouco acima da faixa de conforto e inferior à temperatura do corpo humano.

No ambiente interno a ventilação natural pode ser obtida, basicamente, de duas maneiras: através do 'efeito chaminé' ou por pressão do vento. O efeito chaminé corresponde ao fluxo de ar gerado pelo gradiente vertical de temperatura. A ocupação, as atividades e os equipamentos geram calor, o que eleva a temperatura e reduz a densidade do ar, deslocando-o para a porção superior do ambiente. O posicionamento de aberturas em alturas distintas permite que o ar aquecido saia pela abertura superior e o ar externo entre pela abertura inferior (TOLEDO, 1999).

---

[1] Considerando a temperatura do meio inferior à temperatura do corpo humano

O efeito chaminé é capaz de gerar passivamente um fluxo de ar em locais caracterizados por longos períodos de calmaria do vento. A eficácia do fenômeno é proporcional a diferença de temperatura e a distância entre as aberturas de entrada e saída do ar. Esta estratégia é útil para a manutenção da qualidade do ar em países de clima frio e/ou em ambiente de baixa ocupação e permanência. O efeito chaminé geralmente é pouco eficaz no incremento do conforto térmico, pois a velocidade da corrente de ar gerada pela diferença de densidade é baixa e, consequentemente, não acelera as trocas de calor por convecção e a evaporação da umidade sobre a pele. Assim, para o clima quente e úmido, onde as diferenças de temperatura entre o meio interno e externo é pequena e a ventilação é abundante, o efeito chaminé torna-se inexpressivo, pois a pressão exercida pelo vento sobre a fachada é superior à pressão exercida pela diferença de densidade do ar interno.

A ventilação natural causada por efeito do vento ocorre quando há diferença de pressão do ar nas aberturas. Considerando a quantidade e a disposição das aberturas em determinado ambiente, a ventilação pode ser definida como unilateral ou cruzada. A primeira ocorre quando as aberturas estão dispostas em paralelo, ou seja, voltadas para a mesma orientação. Normalmente, na ventilação unilateral captação e remoção do ar é realizado pela mesma abertura. A ausência de uma abertura para a exaustão do ar interno dificulta a entrada e a distribuição do vento e a ventilação só ocorrerá quando a pressão dinâmica incidente na abertura for superior à pressão estática no interior do ambiente. A dimensão e a disposição da abertura na fachada podem melhorar a ventilação do ambiente devido às forças ascensionais provocadas pela diferença de temperatura entre o ar interno e externo. Contudo a ventilação unilateral tende a apresentar baixos valores de renovação do ar e o benefício sobre o conforto torna-se pouco perceptível ao se afastar da abertura (KLEIVEN, 2003).

A ventilação cruzada ocorre quando há aberturas em paredes distintas e preferencialmente em faces opostas. É denominada cruzada direta se as aberturas estão voltadas para o meio externo, e cruzada indireta quando uma das aberturas dá acesso a outro ambiente. A quantidade

de ambientes que o vento atravessa até voltar ao meio externo aumenta a perda de carga e reduz a intensidade do escoamento. Usar a porta como abertura de saída nem sempre é conveniente por questões de privacidade.

A intensidade do fluxo de ar na ventilação cruzada é proporcional à diferença de pressão e ao tamanho das aberturas. O fracionamento das aberturas, a forma e o tipo de esquadria e o leiaute interno implicam em perdas de carga e tendem a reduzir a intensidade do fluxo.

2.2 Ventilação e conforto térmico

As tentativas de modelar os efeitos das variáveis ambientais sobre a satisfação dos usuários, nos moldes que conhecemos atualmente, remontam à meados do século XX. Olgyay (1963) e Givoni (1998) desenvolveram zonas de conforto, representadas graficamente sobre uma carta bioclimática. Em ambas a amplitude era influenciada pela ventilação, normalmente expandindo o limite superior da temperatura de conforto. A zona de conforto desenvolvida por Givoni era diferenciada para países desenvolvidos e em fase de desenvolvimento que considera os indivíduos dos países em desenvolvimento adaptados à uma amplitude térmica maior (linha tracejada na Figura 2). Contudo, vale lembrar que o estudo foi desenvolvido a partir de pesquisas realizadas em Israel, nos Estados Unidos e na Europa considerando as expectativas de temperatura em edificações sem ar-condicionado. Portanto, considerando o clima dos países analisados e as condicionantes impostas pela metodologia adotada, faz-se necessários observar os resultados obtidos com cautela para evitar a elaboração de conclusões precipitadas.

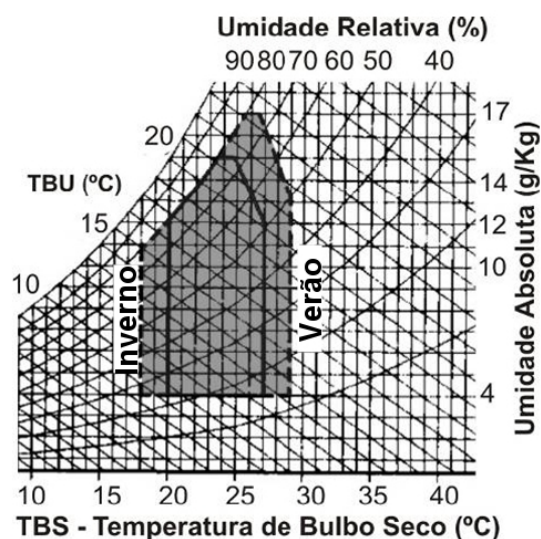



Figura 2 – Representação da zona de conforto desenvolvida por Givoni.

Fonte: Elaborado a partir de Givoni (1998).

O *software Analysis 2.1 Bio* (LAMBERTS, et al., 2003) realiza a avaliação de dados climáticos e apresenta as estratégias de projeto adequadas para melhor adaptar a edificação ao clima em estudo de acordo com a classificação proposta por Givoni. A análise, feita com base no arquivo climático de referência – TRY disponibilizado pelo *software*, mostra que o clima de Natal/ RN é caracterizado por um grande percentual de horas de desconforto por calor (Tabela 1 e Figura 3). A fração correspondente às horas de desconforto por frio é inexpressiva e apenas um pequeno percentual aponta o clima como confortável.

Tabela 1 – Caracterização geral do clima de Natal/ RN

Condição	Percentual de horas de desconforto durante um ano
Conforto	14%
Desconforto	86%
➔Frio	0,58%
➔Calor	85,42%

Fonte: Elaborado a partir dos resultados apresentados pelo *software Analysis 2.1 Bio*.

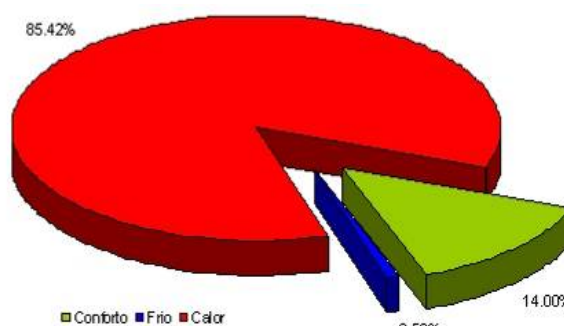



Figura 3 – Gráfico dos dados do clima de Natal/ RN.

Fonte: Elaborado a partir dos resultados apresentados pelo *softwares Analysis 2.1 Bio*.

Dentre as seis categorias indicadas para amenizar os efeitos de desconforto do clima de Natal, a ventilação responde sozinha por aproximadamente 70% das horas. Somadas às categorias que aliam a ventilação à outra estratégia, este percentual sobe para aproximadamente 84%. O ar-condicionado é recomendado para pouco mais do que 1% das horas de desconforto (Tabela 2 e Figura 4).

Tabela 2 – Estratégias bioclimáticas para o clima de Natal/ RN

Estratégia	%
Ventilação	70,10
Ventilação/Massa térmica	1,20
Vent.Massa/Resfri.evaporativo	12,90
Massa Térmica p/ Resfri.	0,10
Massa/Resfri.Evaporativo	0,02
Massa Térmica/Aquec. Solar	0,60
Ar Condicionado	1,40
➔Sombreamento	99,40

Fonte: Elaborado a partir dos resultados apresentados pelo *software Analysis 2.1 Bio*.

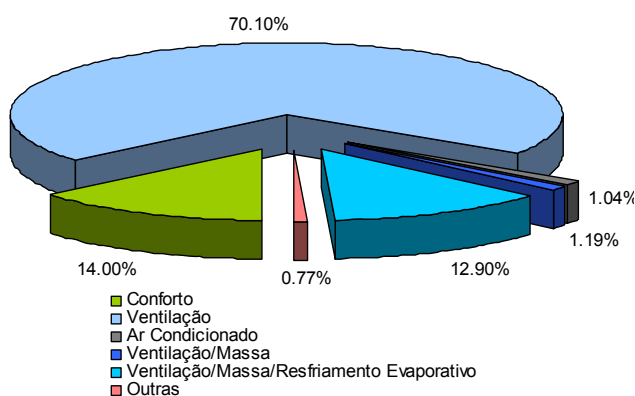



Figura 4 – Gráfico das estratégias bioclimáticas para o clima de Natal

Fonte: Elaborado a partir dos resultados apresentados pelo *software Analysis 2.1 Bio*.

Portanto, é possível afirmar que no clima local o condicionamento passivo torna-se eficiente quando a temperatura no interior das edificações é inferior à temperatura externa. Para tanto, é preciso evitar os ganhos térmicos pela envoltória (OLIVEIRA, 2006), fazer uso da ventilação para remover a massa de ar aquecida e promover resfriamento cutâneo através do movimento do ar.

Todavia, percebe-se que esta avaliação é passível de questionamentos, visto que a população de regiões de clima quente e úmido tendem a se adaptar naturalmente às condições do meio (BONNEAUD, et al., 2001). Além disto, há questões pertinentes a metodologia e ao período utilizados para a determinação do ano climático de referência. De acordo com Goulart, et al. (1998), o TRY consiste na seleção, dentre um período de medição, do ano que não apresenta

valores extremos de temperatura do ar. No caso de Natal, o período corresponde aos anos de 1951 e 1970, sendo o ano de 1954 o ano climático de referência. Considerando a dinâmica climática global é possível que os dados de 1954 não correspondam as condições atuais. Diante disto, e levando-se em consideração a disponibilidade e praticidade dos equipamentos de medição, torna-se evidente a necessidade de dados climáticos mais recentes. Contudo, não há uma metodologia ou trabalhos publicados que respaldem a utilização de um ano climático qualquer, mesmo que este seja mais recente ou obtido através de equipamentos mais modernos. Assim, adotou-se neste trabalho o TRY por ser o que apresenta maior número de trabalhos desenvolvidos.

Os índices de conforto vem sendo constantemente revisados e adaptados com o objetivo de sanar as limitações encontradas nos modelos tradicionais, os quais podem ser classificados em dois grupos: os que se baseiam no balanço térmico e os modelos adaptativos. Resumidamente, o balanço térmico consiste em adotar o corpo humano como um elemento que troca calor com o meio circundante e a sensação de conforto é o resultado destas trocas. O índice mais difundido de balanço térmico é o PMV/PPD[2], proposto por Fanger em 1972. Suas qualidades o tornaram o modelo de referência para a Norma Internacional ISO 7730 a para a ASHRAE Standard 55-2004. Todavia, sua aplicabilidade em edificações naturalmente ventiladas em clima quente tem sido cada vez mais questionada em diversos trabalhos por dar pouca ênfase à adaptação dos usuários.

Os modelos adaptativos são baseados em experiências de campo e relacionam a sensação térmica com as temperaturas médias mensais, considerando a adaptabilidade dos indivíduos (Figura 5). A adaptabilidade considera os aspectos fisiológicos, que tornam o organismo mais tolerante a temperaturas elevadas no verão e a temperaturas mais baixas no inverno. Além disto, considera também a possibilidade do indivíduo interagir com o ambiente, abrindo uma

---

[2] O “Predicted Mean Vote – PMV” e o “Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD” é um método de quantificar tanto o desempenho térmico dos ambientes quanto o percentual de usuários insatisfeitos. O PMV varia de -3 (frio) à +3 (calor), sendo o zero a condição de neutralidade.

janela, mudando de postura, trocando de roupa ou escolhendo locais mais confortáveis. Todavia, por ser uma variável subjetiva, a adaptabilidade é estudada de maneira empírica, o que permite o desenvolvimento diversas equações relacionando a sensação de conforto e temperatura média mensal.

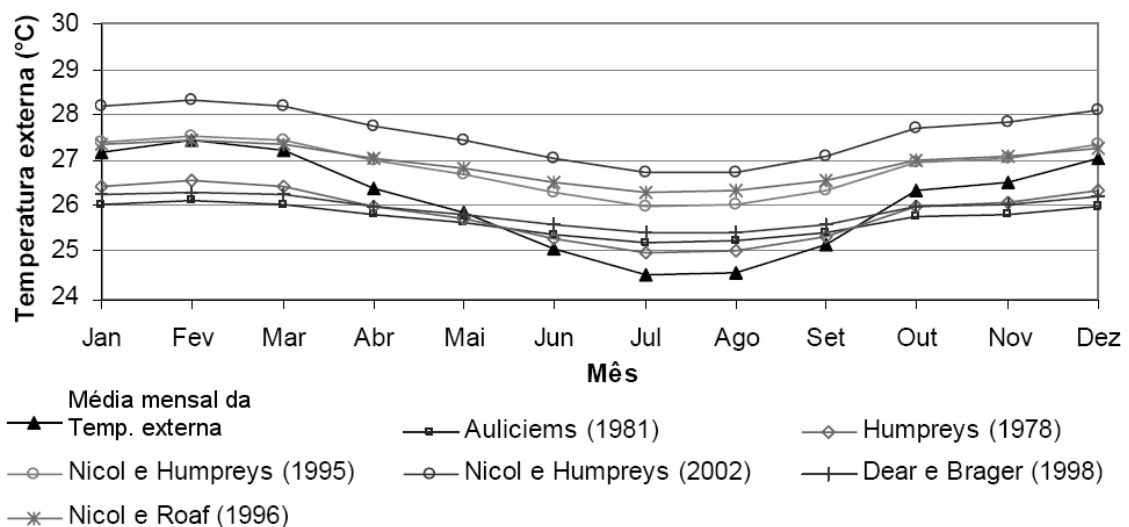



Figura 5 – Gráfico da aplicação de modelos adaptativos ao clima de Natal/ RN

Fonte: Adaptado a partir de Oliveira (2006).

Oliveira (2006) sugere o modelo de Humphreys (Equação 1) e a sua respectiva zona de conforto (Equação 2) como o mais adequado ao clima de Natal. O modelo considera que a temperatura de neutralidade[3] varia de acordo com a temperatura média mensal.

$$Tn = 0{,}534 \times Tm + 11{,}9 \quad \textbf{Equação 1}$$

$$Zc = Tn \pm 2{,}5\ ºC \quad \textbf{Equação 2}$$

Onde:

Tn é a temperatura de neutralidade (ºC)

Tm é a temperatura média mensal (ºC)

Zc é a Zona de conforto

[3] O conceito de Temperatura de Neutralidade é semelhante ao de Temperatura de Conforto, ou seja, é a temperatura na qual o balanço das cargas térmicas sobre o corpo humano é nulo. De acordo com o modelo de Fanger, a temperatura de neutralidade é obtida quando PMV = 0 e representa um percentual de insatisfeitos inferior à 5%.

Aplicando as equações nos dados do arquivo climático de referência de Natal obtêm-se a zona de conforto proposta por Humphreys e Nicol (Figura 6). Percebe-se que no período do verão o limite superior da zona de conforto é de aproximadamente 29 ºC, enquanto que no inverno é pouco acima dos 27 ºC. O limite inferior da zona de conforto também varia em aproximadamente 2 ºC ao longo do ano, chegando à quase 24 ºC no verão e ficando pouco acima dos 22º C no inverno. Fica claro, portanto, que o modelo adaptativo considera os indivíduos mais tolerantes a temperaturas elevadas no verão e menores no inverno.

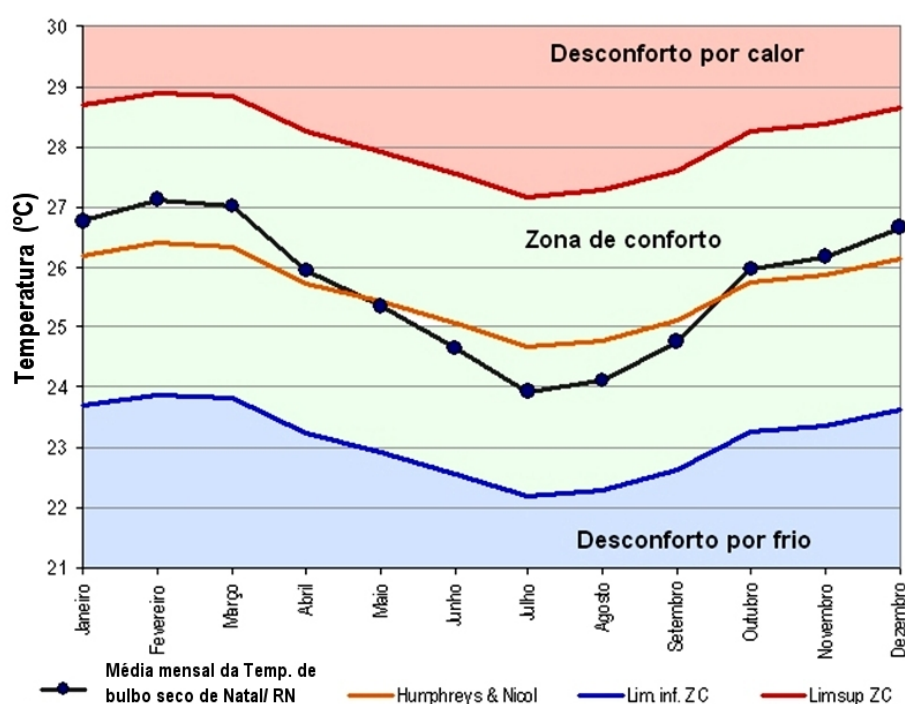



Figura 6 – Gráfico da zona de conforto para Natal, segundo Humphreys & Nicol.
Fonte: Elaborado a partir de Oliveira (2006)

Paralelamente ao desenvolvimento dos índices de conforto, há estudos que se dedicam a quantificar o benefício da ventilação sobre o nível de satisfação dos indivíduos. Segundo Nicol (2004) o limite superior da zona de conforto pode ser elevado caso haja circulação de ar, pois a ventilação aumenta a tolerância dos indivíduos à temperaturas elevadas. O acréscimo é determinado pela Equação 3

$$dT = 7 - \left(\frac{50}{4 + 10\sqrt{v}} \right)$$ **Equação 3**

Onde:

dT é o acréscimo de temperatura de conforto (°C)

v é a velocidade do ar no nível dos usuários

A representação gráfica da equação proposta por Nicol (Figura 7) permite verificar que é possível aumentar em mais de 3 ºC o limite superior da zona de conforto com ventilação de 1 m/s. O estudo de Nicol adotou a velocidade 1 m/s como limite por considerar as condições normalmente encontradas em ambiente de trabalho e estudo, onde o fluxo de ar em grande intensidade pode provocar situações desagradáveis como o vôo de papéis sobre as mesas. Porém, é notório que diversas atividades podem ser executadas com velocidades superiores a 1 m/s sem nenhum efeito indesejado, tais como as atividades de lazer e domésticas. Deste modo deve-se considerar o estudo de Nicol como uma referência que sinaliza o incremento da sensação de conforto na presença da ventilação, mas sem limitar os benefícios gerados à velocidade limite adotada em seu estudo.

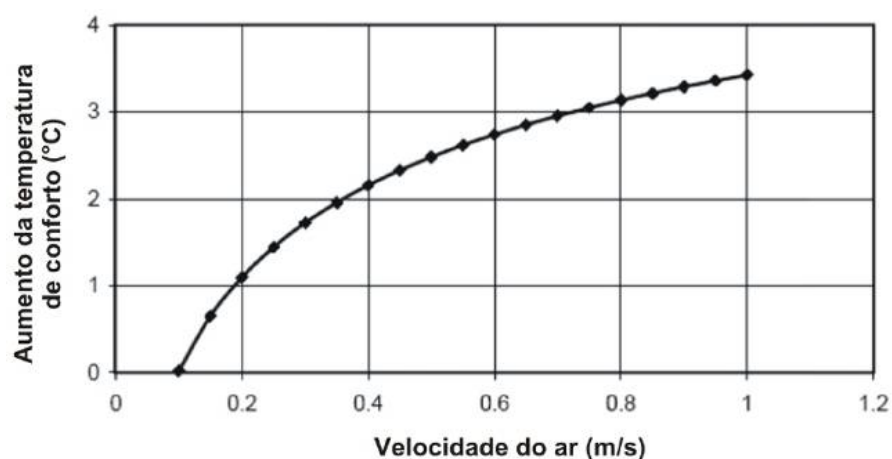



Figura 7 – Gráfico do incremento sobre a temperatura limite de conforto.
Fonte: Nicol (2004)

A aplicação da Equação 3 na Equação 2 resulta no aumento na amplitude térmica da zona de conforto para diferentes velocidades do ar (Figura 8), o que torna viável a ocupação de

ambientes naturalmente condicionados nos períodos em que a temperatura do ar está elevada, desde que haja ventilação constante.

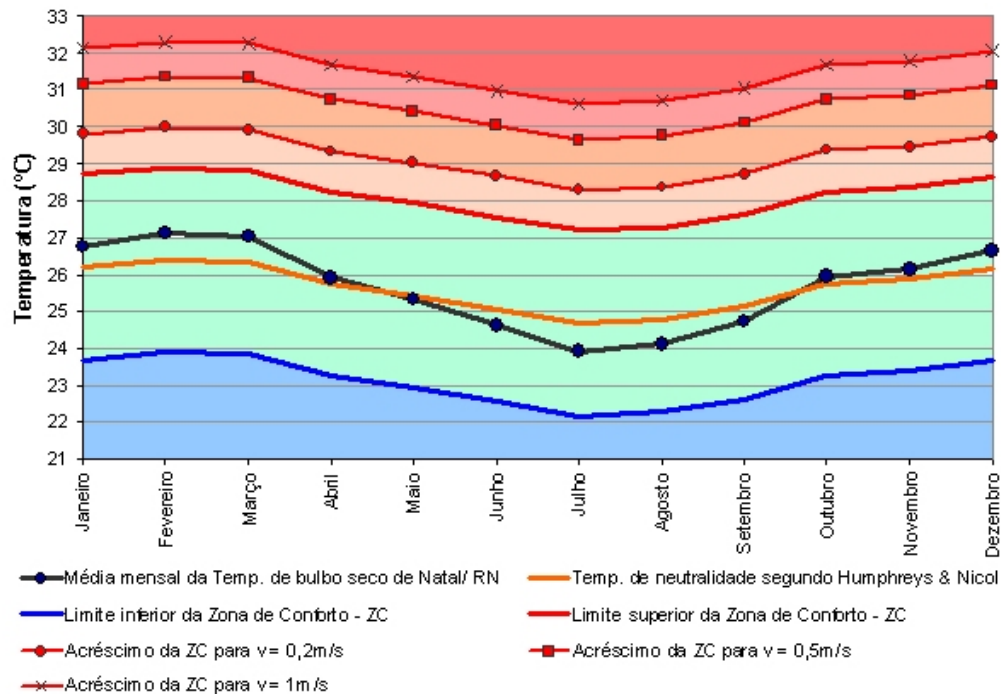



Figura 8 – Gráfico da aplicação de modelos adaptativos ao clima de Natal/ RN.

Contudo, os critérios de avaliação do conforto térmico para clima quente e úmido ainda são polêmicos e tendem a apresentar limitações em algum item específico, seja nas variáveis climáticas consideradas ou na condição particular para qual foi desenvolvido. A escolha do índice de conforto deve considerar, além do clima, o tipo de edificação, as atividades exercidas, o perfil dos usuários e as condições psico-ambientais. Portanto, fica evidente a dificuldade em apontar um critério único na bibliografia que contemple satisfatoriamente os efeitos da temperatura de bulbo seco, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura radiante média, bem como da vestimenta e possibilidade de interação com o meio. Os modelos apresentados neste trabalho não são definitivos e buscaram apenas mostrar como a ventilação pode incrementar a sensação de conforto e como os estudos quantificam este incremento.

2.3 Ventilação e salubridade

A ventilação natural promove ambientes saudáveis por ser capaz de: dificultar o surgimento de mofo, dispersar particulados provenientes das atividades humanas e reduzir a concentração de gases nocivos e dos compostos orgânicos voláteis. A umidade em níveis elevados e por longos períodos, situação característica do clima quente e úmido, favorece o surgimento de mofo pela condensação do vapor de água nas paredes e nas demais superfícies. Contudo, pequenas taxas de renovação, inferiores a 2 trocas/ hora, são suficientes para impedir o crescimento da colônia de fungos (EST, 2006). Ambientes naturalmente ventilados alcançam facilmente taxas de ventilação superiores a 2 trocas/ hora, porém, o mesmo pode não ocorrer em edificações artificialmente climatizadas, que normalmente possuem as esquadrias seladas para impedir a infiltração de ar.

Pequenas taxas de ventilação também são suficientes para a dispersão de odores e demais poluentes domésticos provenientes da respiração, da cocção e dos produtos químicos. A adoção da taxa de renovação para impedir o surgimento e crescimento de mofo e suficiente para satisfazer as demais demandas de ventilação.

Tabela 3 – Taxa de ventilação para controle de poluentes

Situação	Taxa de ventilação (litros de ar/ segundo/ pessoa)
Minimizar o crescimento de mofo	7,0
Controle de Compostos orgânicos voláteis	6,5
Controle de odores do corpo	3,5
Controle de óxidos nitrosos provenientes da cocção	3,0
Prover oxigênio	1,0

Fonte: Elaborado a partir de EST (2006)

Apesar de não haver níveis seguros para permitir a presença de fumantes em recintos fechados, é evidente que a ventilação natural é o instrumento mais eficaz para renovar o ar viciado por fumaça de cigarro ou qualquer outro tipo de material em combustão. O mesmo é valido para reduzir a concentração de vapor e de gases gerados por atividades ocasionais, tais como a pintura das parede e a aplicação de inseticida.

2.4 Ventilação e projeto

O clima quente e úmido apresenta particularidades a serem consideradas no processo projetual que visa o conforto dos usuários. A umidade do ar elevada dificulta a evaporação do suor, o que reduz sua ação sobre o resfriamento do corpo. Por outro lado, a baixa latitude favorece o ganho térmico pela envoltória, principalmente pela coberta, que pode resultar em uma carga térmica considerável por radiação. O sombreamento reduz significativamente os ganhos térmicos, enquanto que a ventilação resfria a massa edificada e o corpo humano. A soma destas duas estratégias é capaz de proporcionar conforto na maior parte do ano, e por isto, são apontadas como as recomendações projetuais mais adequadas para o clima quente e úmido (Tabela 2 e Figura 4).

Considerando que a temperatura do ar em Natal/ RN é amena na maior parte do dia e que não é demasiadamente alta nas horas mais quentes, é possível prover ambientes termicamente confortáveis sem a necessidade de estratégias de termo-acumulação. A renovação constante do ar, proporcionada pela ventilação natural, permite aproximar as temperaturas externa e interna, removendo a massa de ar aquecida dos ambientes, desde que sejam evitados os ganhos térmicos excessivos (BONNEAUD, et al., 2001).

Além da prevenção e redução dos ganhos térmicos, o efeito psicológico de resfriamento provocado pelo movimento do ar sobre a pele também contribui para a sensação de conforto. Logo, deve ser estimulado o uso de elementos arquitetônicos, principalmente daqueles pertinentes à composição da envoltória, que sejam capazes de incrementar o desempenho térmico da edificação. Estes elementos devem ser dimensionados e orientados para que funcionem como um filtro das condicionantes climáticas, barrando ou pelo menos minimizando as intempéries indesejadas, tais como: temperaturas elevadas, radiação solar direta e as rajadas de vento de grande intensidade. Holanda (1976) já trazia em seu roteiro a necessidade do leiaute livre, dos muros vazados, da ventilação cruzada e do peitoril ventilado. Estas estratégias são facilmente incorporadas ao projeto sem a necessidade de padronização de soluções. Contudo, a consciência

dos usuários e a interação com a edificação são fundamentais no sucesso do condicionamento passivo. A ausência de protetores solares nas aberturas, o arraste da chuva pelo vento e a entrada de insetos são algumas justificativas utilizadas para manter as janelas fechadas, obstruídas por cortinas ou mesmo inoperantes, e revelam a indiferença dos ocupantes em relação ao desempenho da edificação.

O desempenho térmico da edificação, e por extensão a eficácia da ventilação natural, é resultado de decisões arquitetônicas tomadas ainda na fase de esboço. Percebe-se que os projetistas tendem a supervalorizar regras pouco fundamentadas para tomar decisões referentes à ventilação natural. A própria legislação urbana trata a ventilação de maneira incipiente e contribui para a ineficácia da ventilação. Observa-se que o uso da ventilação com propriedade está fortemente ligado à experiência e ao conhecimento empírico do arquiteto, ao invés de ser resultado da aplicação algum método científico. A quantidade e a complexidade das variáveis envolvidas, tais como: a implantação, a forma e a escala da edificação, o dimensionamento das aberturas, a disposição interna dos ambientes e o entorno interferem no aproveitamento do vento externo e implicam no aumento das incertezas envolvidas.

A literatura voltada para os cursos de graduação em arquitetura apresenta recomendações resultante de estudos em túneis de vento iniciados na década de 60. A bibliografia específica de mecânica dos fluidos é complexa e incompatível com a prática projetual. Esta lacuna entre a literatura básica e a avançada contribui para desestimular análises compatíveis com o processo projetual. No final, o arquiteto é forçado a adquirir sensibilidade através do método de ‘tentativa e erro’.

As recomendações generalistas da literatura de base são utilizadas por ter forte apelo visual, por ser facilmente incorporadas no desenvolvimento do projeto ou até mesmo porque são as únicas que o projetista conhece. Apesar do forte apelo didático e de fazerem uso de uma linguagem gráfica compatível com o processo projetual, estas recomendações possuem algumas limitações que normalmente são ignoradas. Os estudos geralmente se limitam à orientação das

aberturas e à relação entre as áreas de entrada e a de saída do ar (Figura 9). Não há menção sobre as condições de contorno, as perdas de carga das esquadrias ou mesmo as dimensões dos ambientes. Logo, os resultados são passíveis de questionamentos, tendo em vista que apresentam pequenas variações, as quais podem ser consequência da própria incerteza do método adotado. Há casos que contrariam o senso comum, onde o aumento da abertura de saída diminui a velocidade do ar no interior da edificação (destaque da Figura 9).

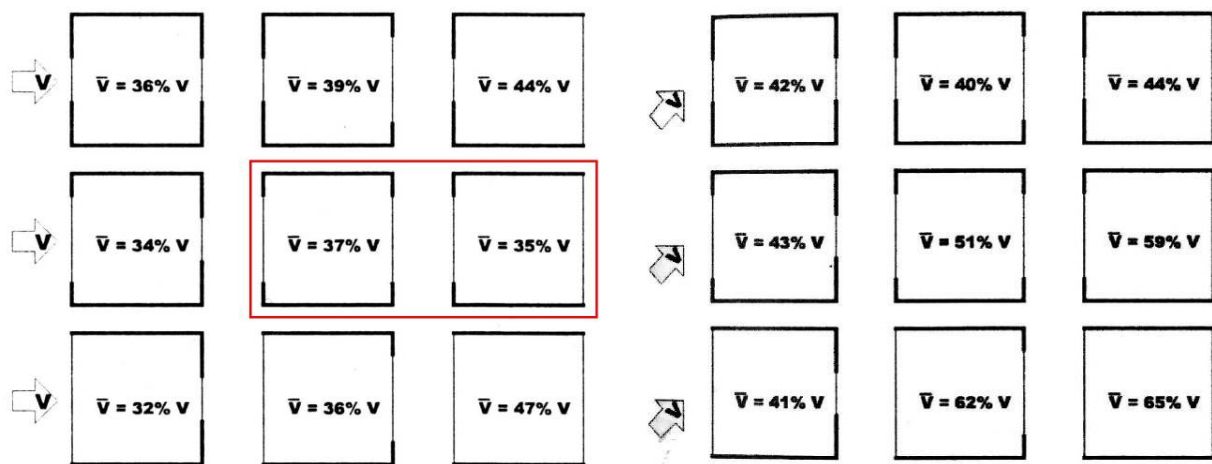



Figura 9 – Velocidade interna media em função da relação entre as aberturas de entrada e saída do ar para incidências do vento a 90º e 45º.
Fonte: Givoni (1976), apud Bittencourt e Cândido (2005).

Todavia, as recomendações generalistas têm boa aceitação entre os projetistas, o que facilita sua disseminação, e podem influenciar decisões relativas à orientação, à forma, ao leiaute interno e à envoltória das edificações. Portanto, é oportuno que estas recomendações sejam revistas e ajustadas ao projeto em desenvolvimento através de novas ferramentas de análise.

Uma parcela considerável dos trabalhos desenvolvidos nos últimos anos com o objetivo de propor ferramentas de auxílio à tomada de decisões referem-se ao desenvolvimento de *softwares* que disponham de interface amigável, tempo de cálculo reduzido e a opção avaliação paramétrica (GARDE, et al., 2004). Os *softwares* complexos, que precisam ser alimentados com uma grande quantidade de variáveis, tendem a se distanciar do processo projetual, principalmente das fases iniciais, nas quais o enfoque é a forma e a orientação da edificação. Os *softwares* que tratam da

geometria solar com o objetivo de dimensionar os elementos sombreadores conseguem oferecer uma resposta imediata e satisfatória baseado apenas em informações quanto a latitude, a longitude, o azimute da fachada e o tamanho da abertura. A facilidade de operação e a utilização de dados familiares aos projetistas facilita a inserção destes *softwares* em todas as etapas do desenvolvimento do projeto. O mesmo ainda não ocorre com os programas de simulação termo-energética, que costumam exigir a modelagem detalhada da edificação e a caracterização das propriedades térmicas de todos os materiais e sistemas construtivos. Além disto, o tempo de processamento, de compilação e de análise dos resultados é normalmente elevado. Já não bastasse a complexidade do fenômeno, a simulação da ventilação natural em edificações ainda sofre com a pouca oferta de *softwares* disponíveis. O TAS Ambiens (EDSL, 2008a) é o que mais se aproxima desta idéia através da representação bi-dimensional do fluxo de ar interno. A predição tri-dimensional da ventilação remete aos *softwares* de escoamento de fluidos, desenvolvidos para problemas de engenharia e, portanto, pouco adaptados as especificidades da concepção arquitetônica.

A predição da ventilação com baixo grau de incerteza é bem mais complexa no condicionamento passivo do que na ventilação mecânica, tendo em vista a dependência das condições externas (TAN, 2005). Os sistemas mecânicos de ventilação dispõem de mecanismos para controlar a intensidade do fluxo de ar e da taxa de renovação, permitindo que as condições internas permaneçam constantes e independentes das variações climáticas. Tais sistemas são encontrados em edificações que possuem climatização artificial e que fazem uso da ventilação mecânica para assegurar os níveis de salubridade aceitáveis. Entretanto, os usuários tendem a não se interessar na limpeza dos equipamentos (LIDDAMENT, 2006) e a manutenção normalmente só é realizada quando o sistema apresenta defeitos que impossibilitam seu uso. A falta de manutenção preventiva nos sistemas mecânicos implica em acúmulo de particulados nos dutos e desgaste ou entupimento dos filtros, com consequente aumento no consumo de energia e na degradação da qualidade do ar interno.

A ventilação natural apresenta vantagens frente aos sistemas mecânicos: o custo de instalação é bem menor, não consomem energia e a manutenção é mínima. Contudo, ao fazer uso da ventilação natural, deve-se atentar para a qualidade do ar externo, que em função da ocupação do entorno e do tráfego de veículos, pode apresentar níveis elevados de poluentes. Em casos específicos, é recomendada cautela ao adotar a ventilação natural como recurso único para uma ventilação contínua e eficiente (COSTA, 2005).

2.4.1 Ventilação e processo projetual

O processo projetual vem sendo explorado por pesquisadores e projetistas que defendem posições distintas quanto à sequência de ações que descrevem o desenvolvimento do projeto. A prática mostra que cada profissional desenvolve sua própria maneira de projetar, tornado o processo pessoal e de difícil sistematização. Contudo, é possível descrever o processo em linhas gerais como uma sequência de etapas, composta por sucessivas tarefas e decisões a serem tomadas. A caracterização das fases torna possível sugerir abordagens compatíveis com a tomada de decisões (PEDRINI;SZOKOLAY, 2005). Na arquitetura bioclimática, o desempenho da edificação deve ser um objetivo comum a todas as etapas, principalmente nas iniciais, onde a quantidade de alternativas é maior.

Adotando a sistematização proposta por Pedrini e Szokolay, o processo projetual pode ser dividido em quatro etapas. A primeira etapa, denominada Programa, consiste na apresentação das necessidades a serem contempladas pelo projeto e no levantamento das condicionantes legais, geográficas e climáticas do sítio. Estas informações estabelecem os parâmetros que conduzirão o processo criativo do arquiteto. A fase seguinte corresponde ao esboço inicial da edificação e a evolução da forma arquitetônica em busca de compatibilizar o programa de necessidades e as condicionantes do projeto. É na fase de esboço onde as estratégias bioclimáticas são concebidas e ajustadas, e onde a seleção de alternativas adequadas tem maior peso no desempenho final. A possibilidade de testar modelos simplificados referentes aos esboços desenvolvidos em programas de simulação computacional permite quantificar o benefício das alternativas possíveis, dando

argumentos consistentes ao projetista para investir nos elementos com maior repercussão no resultado final.

Definida a forma da edificação, parte-se para o detalhamento da proposta, onde serão descritos e dimensionados os materiais construtivos. A possibilidade de alteração nesta etapa é menor, visto que o foco é na especificação técnica e nos custos. Os aspectos negligenciados nas etapas anteriores dificilmente poderão ser corrigidos nesta fase, pois não é possível realizar alterações significativas no projeto. Em países onde não há a cultura ou obrigatoriedade de classificar o desempenho termo-energético da edificação, o fim da etapa de detalhamento representa a conclusão do trabalho do arquiteto. O projeto é encaminhado aos demais agentes responsáveis pela elaboração dos projetos complementares, dos contratos e do orçamento. O arquiteto geralmente volta a participar do processo na fase de execução, mas para fins de acompanhamento e fiscalização.

Quando há a necessidade de classificar o edifício para aprovação perante os órgãos reguladores, a atuação do arquiteto inclui a etapa de avaliação final da proposta com a predição do desempenho termo-energético. Esta etapa é crucial, pois a desaprovação do projeto pode implicar no retorno à fase de concepção, com ônus tanto para o cliente quanto para o projetista. A necessidade de testar a proposta final leva ao uso tardio da simulação computacional, que nesta etapa limita-se a apontar o sucesso ou fracasso de todo o processo. Buscar melhorias de desempenho nas fases finais é pouco eficaz, visto que as alterações possíveis são mínimas e restritas aos elementos construtivos e aos sistemas prediais.

A integração entre a simulação e a arquitetura só é efetiva se ocorrer nas três fases que constituem de fato o processo projetual: a fase de esboços, de desenvolvimento e de detalhamento. No primeiro momento, onde as discussões giram em torno de diagramas, relação de espaço e previsão de custos, a simulação pode auxiliar na predição de consumo de energia, identificando o peso de cada variável no desempenho final. Considera-se a fase de esboço importante para o desempenho térmico da edificação, pois é neste momento em que se delineia a

forma, a orientação, a área envidraçada e os protetores solares. A simulação pode ser aplicada à fase de desenvolvimento para determinar e dimensionar os elementos de envoltória e de captação do vento. Na terceira fase a simulação pode ser utilizada para ajustar as estratégias de ventilação e iluminação natural, bem como para verificar a eficiência das decisões projetuais (MORBITZER, et al., 2001).

2.5 Elementos arquitetônicos que influenciam a ventilação interna

A envoltória, enquanto elemento filtrante das variáveis climáticas, tem forte influência sobre o desempenho termo-energético da edificação. Projetar elementos de sombreamento, de uso da iluminação natural com baixo ganho térmico e de aproveitamento da ventilação natural já é um trabalho de considerável complexidade. Aliar isto a questões estéticas, culturais e orçamentárias torna-o ainda mais laborioso. A própria natureza do processo projetual induz o projetista a priorizar alguns itens em detrimento dos demais. Deste modo o projeto final será mais bem resolvido nas variáveis que tiveram maior ênfase ao longo do processo. Dentre os aspectos pertinentes ao aproveitamento da ventilação natural, pode-se destacar:

2.5.1 Orientação

O ângulo de incidência do vento é determinante no aproveitamento da ventilação natural, pois a orientação condiciona a distribuição de pressão sobre as fachadas e coberta. Logo, a implantação da edificação no terreno deve procurar maximizar a diferença de pressão sobre as aberturas e com isto potencializar o uso da ventilação natural. A atenção com a orientação vai além do terreno, deve considerar a topografia, a altura das edificações do entorno e a canalização do vento pelas vias (TAN, 2005). Edificações localizadas na sombra de vento proveniente de obstáculos verticais dispostos ao longo de uma via tendem a sofrer de baixa diferença de pressão sobre as fachadas, dificultando o fluxo entre os ambientes internos.

A orientação do edifício, e consequentemente das aberturas, é uma decisão típica das primeiras fases de projeto e tem grande influência sobre o desempenho da ventilação. Dificilmente uma escolha equivocada quanto à orientação poderá ser corrigida nas etapas posteriores. Portanto, o projetista deve estar bem amparado por análises do comportamento do vento para decidir pela orientação mais adequada.

2.5.2 Aberturas

Entende-se por abertura qualquer vão nas superfícies verticais da envoltória que permita a passagem do ar entre os meios interno e externo. Normalmente as aberturas correspondem às esquadrias - portas as janelas - dispostas nos planos verticais da edificação. Todavia, há outros tipos de aberturas utilizadas na arquitetura, tais como: pérgulas, cobogós, mucharabi, óculos, bandeirolas, lanternins e aberturas zenitais. As aberturas fazem parte da composição arquitetônica da edificação e geralmente são dimensionadas e posicionadas considerando as questões estéticas ou culturais.

As aberturas compostas por elementos fixos, como os cobogós e as janela tipo boca-de-lobo, normalmente apresentam fendas estreitas e com grande resistência à passagem do ar, pois são dimensionadas visando a segurança, a privacidade e a proteção contra a chuva. A inclinação das venezianas tende a direcionar o vento para a porção superior do ambiente ao invés de favorecer a ventilação no nível do usuário (TRINDADE, 2006). As aberturas móveis permitem o ajuste da área efetiva de ventilação. Contudo, o tipo e a quantidade de peças móveis podem reduzir a área livre da abertura e com isto aumentar a resistência à passagem do ar. As aberturas normalmente são dimensionadas em função da área do ambiente, cuja razão é determinada pelos códigos de obras, pelas normas técnicas ou pela bibliografia específica, que consideram a área de piso ou da fachada como referencial. Todavia, tais documentos não deixam claro o critério utilizado na determinação do percentual estabelecido e tendem a desconsiderar as particularidades de cada sítio quanto à disponibilidade de vento. Seria mais correto se o dimensionamento das aberturas

buscasse proporcionar condições satisfatórias mesmo em situações de baixa disponibilidade de vento.

O dimensionamento das aberturas baseado em percentuais da área de piso ou fachada pode levar a considerações equivocadas, pois aberturas de mesma área, mas com formas distintas, podem apresentar diferença na resistência à passagem do ar. A grandeza que mede a resistência à passagem do vento é o Coeficiente de Descarga - Cd, definido pela Equação 4.

$$Cd = \frac{q}{A}\sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}}$$ **Equação 4**

Onde:
q é a taxa de ventilação (m³/s);
A é a área da abertura (m²);
ρ é a massa volumétrica do ar (Kg/ m³);
Δ**P** é a diferença de pressão estática (Pa).

O coeficiente de descarga é normalmente obtido em experimentos laboratoriais e são úteis para determinar a perda de carga em dutos de ar condicionado. Para o regime de escoamento permanente, o coeficiente de descarga pode ser considerado constante e dependente apenas da forma da abertura, desde que elas estão dispostas em superfícies planas de grande dimensão e com espessura de parede desprezível. Aberturas circulares apresentam menor resistência à passagem do vento do que as retangulares, com o coeficiente de descarga em torno de 0,65, tendendo a zero para baixos valores do número de Reynolds[4]. Os testes de laboratório apontam valores de coeficiente de pressão em torno de 0,60 para aberturas retangulares comumente adotadas em projetos arquitetônicos.

---

[4] O Número de Reynolds representa a razão entre as forças viscosas e inerciais e é definido algebricamente pela equação $Re = \frac{\rho . V^2 L^2}{\mu VL}$, onde:
ρ é a massa volumétrica do ar (kg/m³); **V** é a velocidade do vento (m/s); **L** é a largura do obstáculo (m) e **μ** é a viscosidade dinâmica (kg/m.s).

Porém, tais valores são passíveis de questionamentos quando aplicados na situação real, caracterizada pelo regime transiente do escoamento. Além disto, os experimentos consideram apenas o efeito da abertura, enquanto que na prática a abertura é emoldurada por uma esquadria e faz parte de cômodo, onde o fluxo de ar sofre resistência após adentrar o ambiente. Para aberturas de pequena dimensão, a resistência oferecida pelo ambiente à passagem do ar é baixa: quando a área da abertura é inferior a 10% da área da secção transversal do ambiente a influência das paredes no coeficiente de descarga da janela é inferior à 0,05. Porém, para aberturas de grande dimensão, as forças de fricção nas paredes podem representar alteração significativa de pressão entre as aberturas (CHIUA;ETHERIDGE, 2006).

2.5.3 Leiaute interno

A mobília influencia o comportamento da ventilação interna, pois representa obstáculos à passagem do ar, seja obstruindo, seja direcionando o fluxo. Porém, a maneira como os usuários organizam os móveis no ambiente interno é pessoal e de pouco controle do arquiteto. Holanda (1976) cita a importância de dispor poucos móveis, visando facilitar o fluxo de ar nos ambientes. Todavia, estabelecer relações matemáticas gerais entre a quantidade e tipo de mobília com sua interferência na ventilação é impraticável em função da especificidade de cada caso. A estimativa da perda de carga resultante do leiaute através da simulação computacional exigiria a modelagem dos obstáculos e o posicionamento destes no ambiente. Mesmo que fossem adotadas formas simplificadas para representar os móveis, a maneira de arrumá-los levantaria discussões em torno de questões culturais, funcionais e de gosto. A própria adoção de volumetrias simplificadas para representar os móveis já é passível de críticas, tendo em vista a variedade de formas existentes. Logo, é notável que a definição de um leiaute interno representativo é inviável, mas que deve ser levado em consideração na definição do desempenho da ventilação natural.

2.5.4 Captadores de vento

Os captadores de vento ou torres de vento, comumente utilizados no norte da África e Oriente Médio, visam melhorar a ventilação interna através da captação do vento fresco, livre de particulados e em maior velocidade que passa sobre a coberta das edificações. O ar é então direcionado para os cômodos por meio de dutos. As torres de vento podem funcionar de maneira oposta, como exaustores para o ar interno aquecido. Sistemas mais engenhosos apresentam mecanismos que possibilitam o controle da abertura para a tomada de ar, o que permite ajustar vazão de ar de acordo com a necessidade de resfriar mais rapidamente nos períodos quentes ou de impedir a saída excessiva de calor nos períodos frios (DRACH, 2007). A geometria e a orientação permitem captar apenas o vento predominante ou a ventilação advinda de qualquer direção, além de favorecer o uso da iluminação natural.

O captador de vento pode ser incorporado à edificação, aproveitando elementos que compõem sua volumetria. Lôbo e Bittencourt (2003) avaliaram a eficiência de captadores de vento adaptados às torres de caixa d'água em edificações residenciais no clima quente e úmido através da simulação computacional. Eles concluíram que o posicionamento adequado pode gerar um aumento significativo da ventilação natural, chegando a dobrar a velocidade média do fluxo de ar em alguns ambientes. Este tipo de solução apresenta baixo custo de construção e manutenção, sendo, portanto, compatível com a habitação popular. O desempenho do captador pode ser incrementado com a sofisticação do sistema, através de mecanismos de controle da vazão do ar, aliando à disposição dos usuários em operá-lo.

2.5.5 Peitoril ventilado

O peitoril ventilado consiste em prover aberturas sob a esquadria, protegidas por um elemento com forma semelhante a um “L” invertido. A função deste elemento é complementar a ventilação do ambiente, principalmente quando se faz necessário manter a janela fechada. A abertura sob a esquadria pode ser preenchida por venezianas fixas, móveis ou até mesmo livre de qualquer tipo de esquadria, caracterizando um “rasgo” na alvenaria. Tanto a abertura quanto o

elemento protetor podem apresentar formas e dimensões diversas, mas em qualquer caso deve-se considerar a perda de carga resultante de cada obstáculo a ser contornado pelo escoamento.

Bittencourt et al. (2007) estudaram três tipos de peitoril ventilado, com três tipos de fechamento e três combinações de abertura de entrada para edificação escolar térrea. Os resultados mostraram que o desempenho é bastante dependente da combinação adotada, todavia a maior parte dos casos apresentou contribuição satisfatória para a melhoria nos níveis de conforto. Dentre as formas estudadas: reta, inclinada e curva, esta última foi que apresentou melhor desempenho, pois implica em menor resistência a passagem do ar e melhor distribuição interna do vento.

2.5.6 Parede dupla ventilada

Parede dupla ventilada consiste na construção do elemento de envoltória com duas camadas, deixando uma câmara de ar entre elas. Geralmente a camada externa tem função estética e/ou de segurança e a interna fica responsável pelo acabamento decorativo. O vazio interno serve tanto para o isolamento térmico como para a passagem das tubulações. A possibilidade de uso da fachada dupla para prover ventilação natural através do efeito chaminé em regiões de clima quente e úmido tem atraído a atenção de pesquisadores. Wonga et.. Al. (2008) realizou estudos com auxilio de CFD, para 18 casos de um edifício de escritório em Singapura, variando a espessura da câmara de ar, a altura do ambiente, a diferença de temperatura e a orientação da fachada. Os resultados mostraram que apesar da redução da temperatura interna ser sutil, a fachada dupla ventilada apresenta bom potencial para incrementar o fluxo de ar nos ambientes.

2.5.7 Abertura zenital

Aberturas zenitais são aberturas no fôrro e na coberta, geralmente protegidas por domos ou lanternins, com a função de melhorar a ventilação e iluminação do ambiente, principalmente dos que não dispõem de parede limítrofe com o meio externo. Considerando que o efeito chaminé

no clima quente e úmido apresenta baixa eficácia, tentar prover movimento de ar satisfatório através de aberturas zenitais torna-se pouco eficaz. Em locais onde há ventilação externa freqüente, a abertura zenital pode funcionar tanto como um elemento para captar o vento ou para a exaustão do ar interno aquecido, onde a diferença de pressão entre o meio interno e externo é que indicará o sentido do fluxo de ar. A forma do elemento que cobre a abertura zenital pode ser pensada para criar uma zona de menor pressão, contribuindo para a exaustão do ar interno.

Asfour e Gadi (2007) verificaram, em aberturas zenitais com cobertura semi-circular, que a direção do vento é a variável de maior influência no desempenho da ventilação. De acordo com os autores o melhor desempenho é atingido quando o ângulo de incidência é de 45º em relação ao eixo longitudinal da abertura, e o pior desempenho ocorre quando a direção do vento é paralela ao eixo.

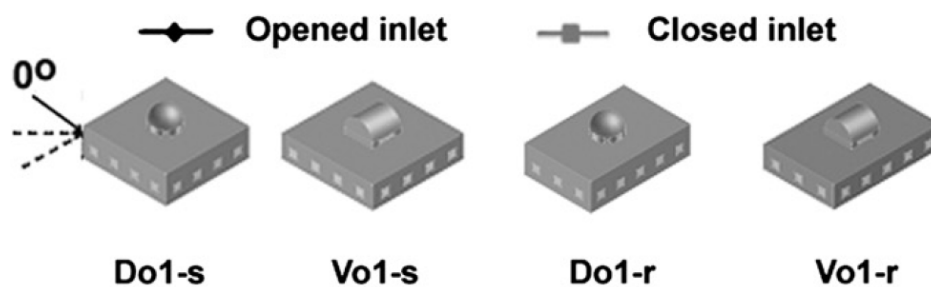



Figura 10 – Modelos adotados por Asfour e Gadi.
Fonte: (ASFOUR;GADI, 2007).

Os autores constataram que a velocidade do vento incidente interfere na velocidade interna do ar, mas possui pouca influência na distribuição do fluxo no ambiente. Ainda de acordo com os autores, a abertura zenital com coberta do tipo meia esfera é mais eficaz para edificações de planta quadrada e a coberta do tipo meio cilindro apresenta melhor desempenho em edificações de planta retangular. Os autores concluíram que o desempenho da ventilação natural é significativo quando o comprimento da abertura zenital é igual ou superior a dois terços do comprimento do edifício e que as cobertas circulares são mais eficazes para exaustão. Todavia,

quando a ventilação cruzada pelas janelas é dominante a ação da abertura zenital torna-se pouco expressiva.

2.6 Coeficientes de pressão

O Coeficiente de pressão - Cp é um parâmetro que caracteriza o padrão do fluxo de ar ao redor da edificação e representa as alterações na pressão estática induzidas pelo vento (ALLARD, 1998). A topografia, a rugosidade, o adensamento urbano e a volumetria da edificação afetam diretamente a distribuição do coeficiente de pressão sobre as fachadas. Comumente assume-se que o CP independe da velocidade do vento, e varia de acordo com o ângulo de incidência. (LIDDAMENT, 1986). Porém, a determinação da pressão sobre as superfícies da envoltória é complexa, pois depende da velocidade e direção do vento, da dimensão e forma da edificação e da posição e tamanho das aberturas (CHEN, 2004). Normalmente, obtêm-se os valores de CP a partir de algoritmos baseados em medições realizadas, principalmente, em túneis de vento. O Coeficiente de pressão é definido algebricamente pela Equação 5.

$$Cp = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^{2}}$$ **Equação 5**

Onde:

P é a pressão causada pelo vento (Pa);

$\mathbf{P_{\infty}}$ é a pressão dinâmica do vento na altura de referência (Pa);

ρ é a massa volumétrica (kg/m³), e

$\mathbf{V_{\infty}}$ é a velocidade do vento no meio (m/s).

A equação permite afirmar que o coeficiente de pressão igual a zero significa que a pressão no ponto é a mesma do fluxo livre. Valores positivos significam que o fluxo de ar está ‘empurrando’ a fachada, como acontece nas faces da envoltória a barlavento, e valores negativos indicam que a pressão do ar esta ‘succionando’ a fachada o que geralmente ocorrem nas superfícies a sotavento.

Apesar da simplicidade das equações, elas envolvem incógnitas de difícil aferição na situação real, tais como pressão ou velocidade em um ponto específico. Alguns métodos foram desenvolvidos na tentativa de simplificar o uso dos coeficientes de pressão. Todavia, não há uma maneira que seja simples e confiável ao mesmo tempo para determinar a distribuição da pressão entorno da edificação. As várias formas que o fluxo de ar pode apresentar simultaneamente, somada à variação das condições externas, torna a predição ainda mais complexa (BONNEAUD, et al., 2001). Estudos para determinar os coeficientes de pressão são geralmente realizados em túneis de vento através de modelos em escala reduzida de edificações representativas. O resultado destes estudos são específicos e aplicáveis a casos similares ao experimentado. A extrapolação dos resultados para situações diversas pode gerar conclusões equivocadas.

Dentre os métodos desenvolvidos para estimar o coeficiente de pressão, destacam-se as representações gráficas, os modelos algébricos, os dados tabelados e os *softwares*. Cada método apresenta vantagens e limitações de uso e aplicação.

2.6.1 Representações gráficas das isóbaras

A estimativa do coeficiente de pressão pode ser apresentada na forma de isóbaras desenhadas sobre a representação esquemática das fachadas em diferentes orientações. A ASHRAE (2001) apresenta os estudos de Davenport e Hui (1982) (Figura 11) para edificações verticais e para as edificações térreas com comprimento maior do que a largura e coberta de duas águas a norma americana trás os estudos de Holmes (1986) (Figura 12). No caso da edificação térrea, os testes foram realizados a cada 45º e na edificação vertical, a cada 15º. Ambos os estudos comprovam que os coeficientes de pressão são máximos quando o vento incide perpendicularmente à fachada e tendem de se aproximar de zero à medida que o vento passa a incidir obliquamente. Os valores são mínimos nas fachadas a sotavento, entretanto os menores valores são encontrados entre 120º e 150º no caso das edificações térreas e entre 75º e 90º nas edificações verticais. Ou seja, no caso dos coeficientes de pressão negativos os menores valores não estão na fachada exatamente oposta ao fluxo de ar.

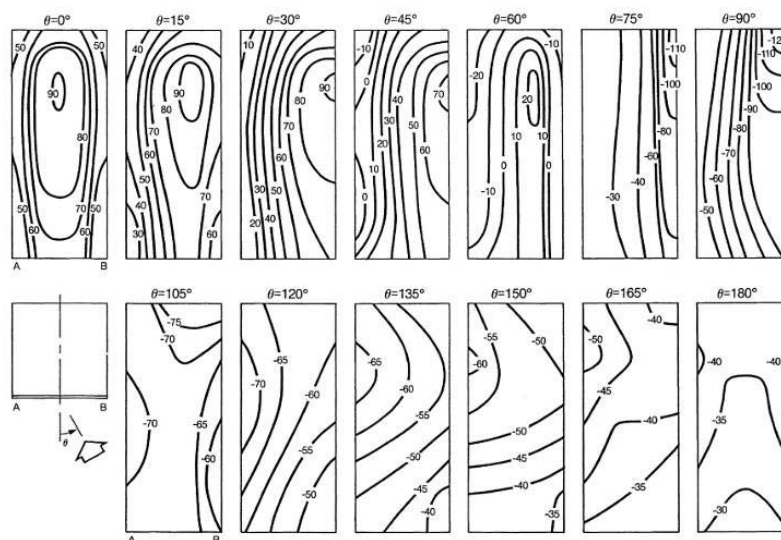



Figura 11 – Isóbaras para edificações verticais
Fonte: Davenport e Hui (1982) apud ASHRAE (2001)

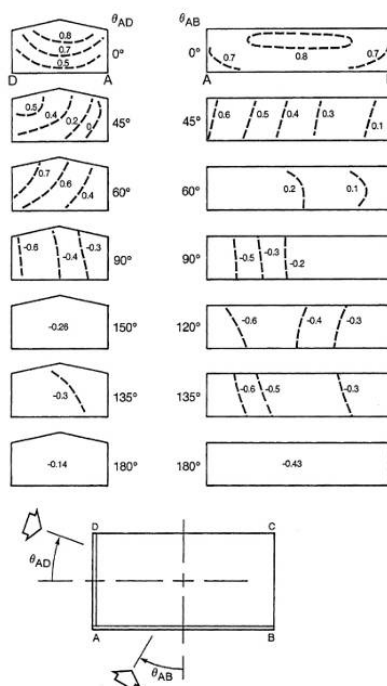



Figura 12 – Isóbaras para edificações térreas
Fonte: Holmes (1986), apud ASHRAE (2001)

2.6.2 Modelos algébricos

Os modelos analíticos permitem avaliar a diferença de pressão sobre as fachadas por meio de planilhas eletrônicas, o que facilita a análise das alternativas projetuais sem a necessidade da aferição visual como ocorre com as isóbaras. Todavia, as equações desconsideram o gradiente de pressão sobre as fachadas, pois apresentam valores médios do coeficiente de pressão, o que tende a mascarar a amplitude dos dados.

Lamberts et.al. (2000) apresenta um método algébrico simplificado para o cálculo da diferença do coeficiente de pressão em fachadas opostas - DCp de edificações isoladas através de duas equações que consideram exclusivamente o ângulo de incidência (Tabela 4).

Tabela 4 - Diferença do coeficiente de pressão do vento para edificações térreas em campo aberto.

Ângulo de incidência (θ), em graus	Diferença do coeficiente de pressão do vento (DCp)
$0 \leq \theta \leq 30^{o}$	1,2
$30^{o} < \theta \leq 90^{o}$	0,1 + 0,0183 x (90 - θ)

Fonte: Lamberts, et. al (2000)

Os autores propõe, também, uma correção para loteamentos de acordo com a distância entre as edificações (Tabela 5).

Tabela 5 – Diferença do coeficiente de pressão do vento para loteamentos.

Distância entre casas	Diferença do coeficiente de pressão do vento (DCp)
Uma casa	0,3 x DCp
Duas casas	0,6 x DCp

Fonte: Lamberts, et.al (2000)

A própria definição das equações revela a sua invariabilidade nos primeiros 30º e o decaimento linear dos valores, tendendo à zero quando o ângulo de incidência se aproxima de 90º (Figura 13).

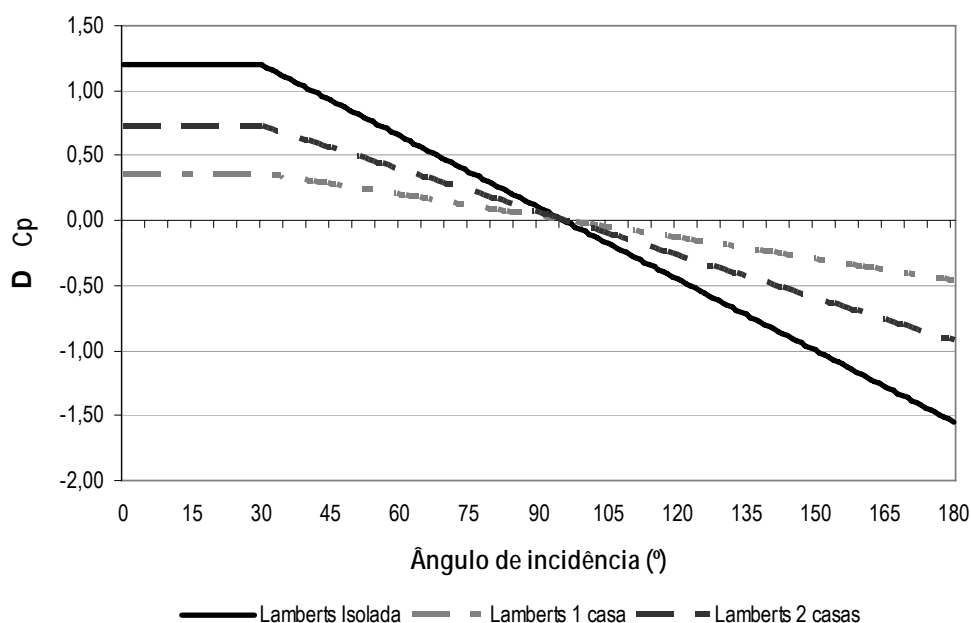



Figura 13 – Gráfico da diferença de coeficiente de pressão em fachadas opostas
Fonte: Elaborado a partir de Lamberts et.al (2000)

Swami e Chandra, apud ASHRAE (2001) apresentam uma equação que considera o ângulo de incidência e a relação entre comprimento e largura da edificação para estimar o coeficiente de pressão nas fachadas (Equação 6). De acordo com os autores, a equação foi desenvolvida a partir de uma base de dados contendo 544 valores médios de CP de oito prédios baixos e um prédio alto.

$$Cp = \ln[1{,}248 - 0{,}703sen(\alpha/2) - 1{,}175sen^2(\alpha) + 0{,}131sen^3(2\alpha G) + 0{,}769cos(\alpha/2) + 0{,}07G^2sen^2(\alpha/2) + 0{,}717cos^2(\alpha/2)]$$ **Equação 6**

Onde:

α é o ângulo entre a direção do vento e a normal da parede considerada, em graus

G é o logaritmo natural da razão entre a largura da parede considerada e a largura da parede adjacente

O teste de sensibilidade da equação foi feito através de cinco modelos hipotéticos, que apresentam relação entre largura da fachada incidente e largura da fachada adjacente iguais à ½, 1, 2, 5 e 10 respectivamente. Aplicou-se a equação para os ângulos de incidência compreendidos

entre 0º e 180º. Observa-se que o comportamento do coeficiente de pressão é muito semelhante para todos os modelos, com variações mínimas para os primeiros 90º de incidência do vento. A partir dos 90º é que o modelo com maior diferença entre as fachadas começa a ter um comportamento diferente dos demais (Figura 14).

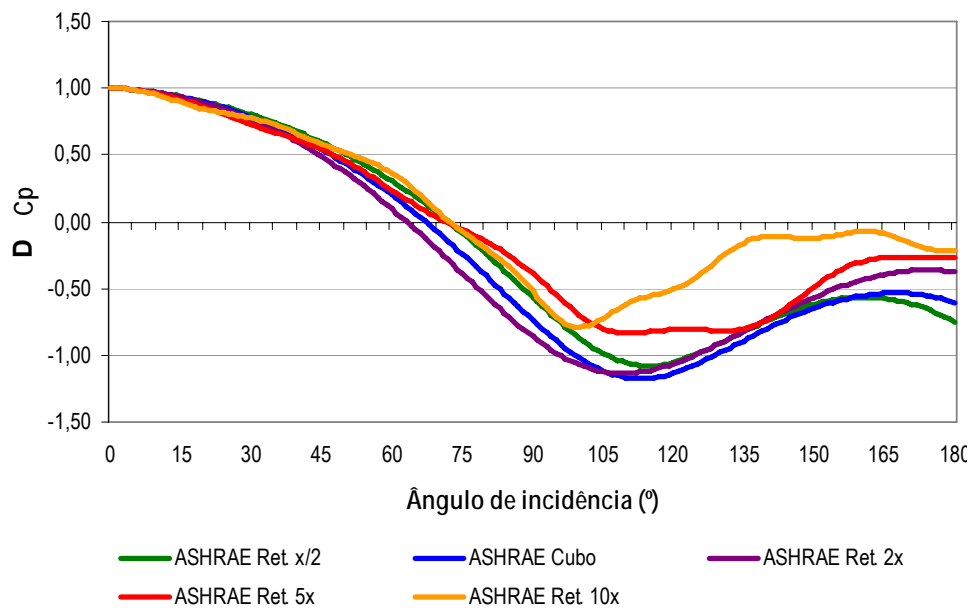



Figura 14 – Gráfico da diferença de coeficiente de pressão em fachadas opostas
Fonte: Swami & Chandra apud ASHRAE (2001)

2.6.3 Dados tabelados

Alguns autores apresentam a distribuição dos coeficientes de pressão nas fachadas por meio de tabelas (Figura 15). Estes dados podem resultar de experimentos ou de modelos matemáticos. A determinação do Cp baseia-se em volumetrias simplificadas e os resultados são específicos da relação entre largura, comprimento e altura adotada nos estudo. Assim, faz-se necessário uma grande quantidade de tabelas visando contemplar as situações mais frequentes. Além disto, as tabelas costumam apresentar valores médios, desconsiderando o gradiente de pressão sobre a fachada. Para evitar tabelas extensas, os resultados de Cp são apresentados para valores específicos de ângulos de incidência. Quando o intervalo é muito grande, a estimativa do Cp para um ângulo intermediário fica prejudicada.

Apêndice B.1
Dados dos coeficientes das pressões do vento para edificações comuns com tipologia simples.
Fonte: Liddament, 1986

	Ângulo do Vento							
Local	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Fachada 1	0,7	0,35	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4	-0,5	0,35
Fachada 2	-0,2	-0,4	-0,5	0,35	0,7	0,35	-0,5	-0,4
Fachada 3	-0,5	0,35	0,7	0,35	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4
Fachada 4	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4	-0,5	0,35	0,7	0,35
Telhado (<10° de inclinação)								
Frente	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7
Fundo	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5
Média	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
Telhado (<11°-30° de inclinação)								
Frente	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5
Fundo	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5
Média	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5
Telhado (>30° de inclinação)								
Frente	0,3	-0,4	-0,6	-0,4	-0,5	-0,4	-0,6	-0,4
Fundo	-0,5	-0,4	-0,6	-0,4	0,3	-0,4	-0,6	-0,4
Média	-0,1	-0,4	-0,6	-0,4	-0,1	-0,4	-0,6	-0,4

Figura 15 – Exemplo de Coeficiente de pressão tabelado
Fonte: Liddament (1986), apud Bitencourt e Cândido (2005)

2.6.4 Softwares

Os *softwares* de simulação termo-energético calculam o coeficiente de pressão com base em arquivos pré-configurados, denominados *templates*. Todavia, os tutoriais nem sempre deixam claro a origem e os dados contidos nestes *templates*. A manipulação do Cp, quando disponível, é feita por arquivo de texto ou inseridos numericamente. Apesar de possuírem interface CAD, os *softwares* não permitem visualizar a distribuição dos coeficientes de pressão sobre o modelo. A dificuldade em tratar o Cp pode levar o operador a adotar um *template* pouco representativo ou incompatível com a situação real.

O *software* de simulação de desempenho TAS (EDSL, 2008b) dispõe de algoritmo próprio para o cálculo do coeficiente de pressão sobre as fachadas e permite que estes valores sejam inseridos pelo usuário via arquivo de texto (Figura 16). O Design Builder (DBS, 2009), apresenta em sua biblioteca interna 12 *templates* que agrupam três tipos de exposição, combinadas a três diferentes ângulos de incidência e possui a opção de criação e edição (Figura 17).

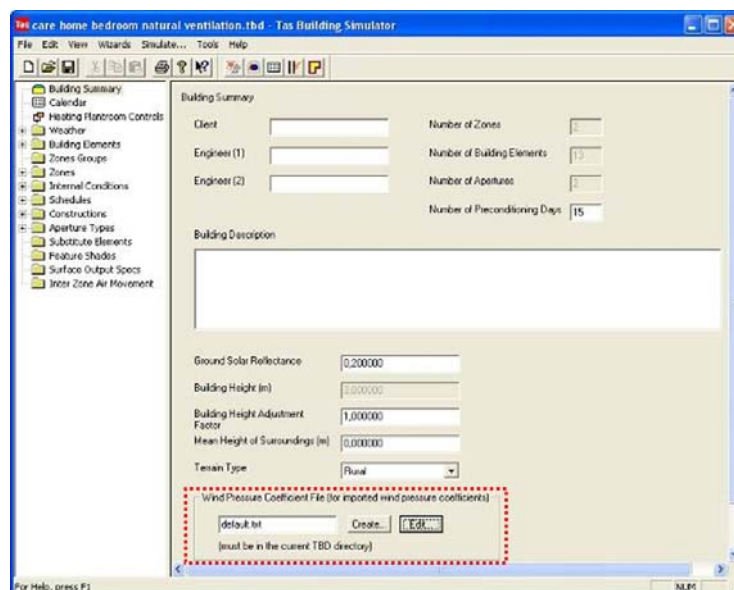



Figura 16 – Tela do *software* TAS com destaque para a entrada do arquivo contendo os Cp

Fonte: EDSL (2008b), adaptado

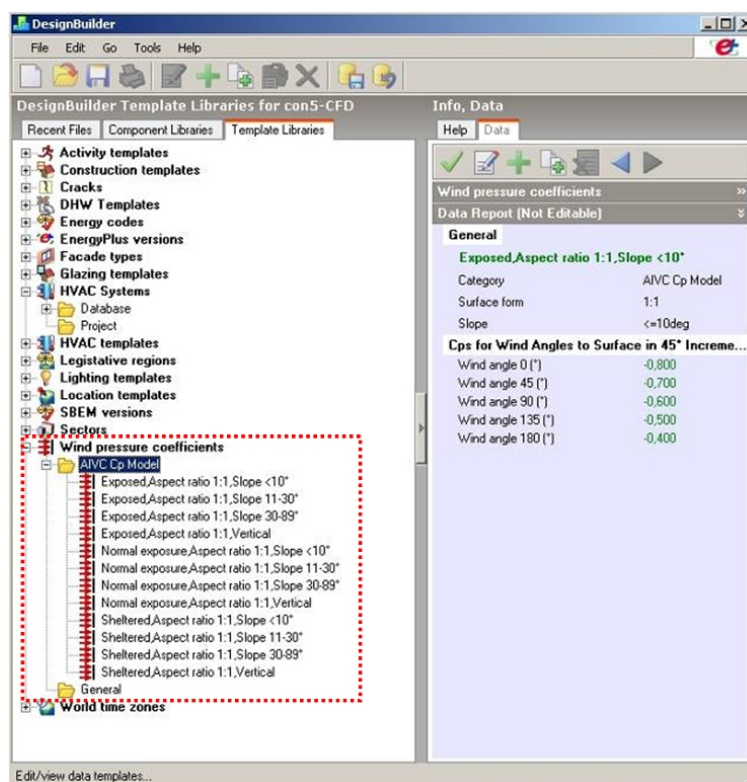



Figura 17 – Tela do *software Designbuilder*, com destaque para os *templates* pré-configurados de Cp

Fonte: DBS (2009), adaptado

O CpCalc+ (GROSSO, 1995) é um *software* específico para o cálculo do coeficiente de pressão (Figura 18) e pode ser utilizado para gerar os arquivos de texto lidos por outros programas de simulação computacional (Figura 19). Apesar de ser de fácil operacionalização, o *software* não permite a modelagem tridimensional da edificação e as dimensões são inseridas numericamente. Também não é explicitado o algoritmo de cálculo utilizado para a determinação do coeficiente de pressão.

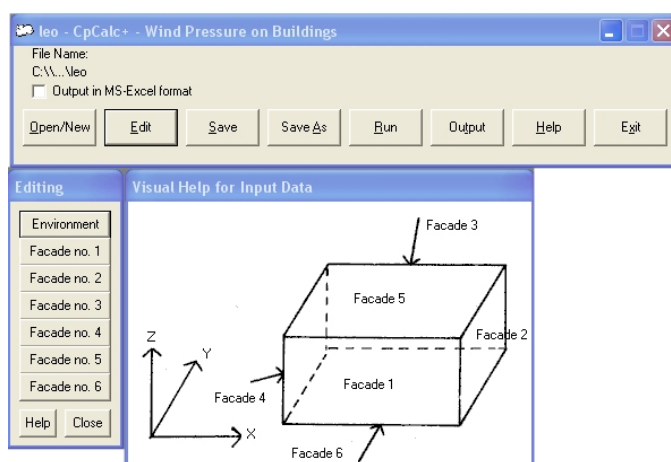



Figura 18 – Interface do CpCalc+

```
File Name: C:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\leonardo\mestrado\Cp calculation\leo - Date: outubro 16, 2007 - 17:59

  Azimuth Angle of the Building:   180,00 deg.
  Wind Direction:                  135,00 deg.
  Wind Velocity Profile  Exponent:   0,40
  Plan Area Density:                20,00%
  Surronding Buildings' Height:      6,00 m
  Height of the Building:            3,00 m
  Lenght of the Building:            3,00 m
  Width of the Building:             7,00 m
  Roof Type:                       flat
  Roof Tilt Angle:                   0,00 deg.

  Facade    Element    X        Z        X/L      Z/H      CP

    1         1       0,00     0,30     0,00     0,10     0,007
    1         2       0,00     1,00     0,00     0,33     0,011
    1         3       1,00     0,30     0,33     0,10     0,007
    1         4       1,00     1,00     0,33     0,33     0,011
  CP average for  facade n° 1   0,009

    2         5       0,00     0,30     0,00     0,10    -0,001
    2         6       0,00     1,00     0,00     0,33    -0,012
    2         7       1,00     0,30     0,14     0,10    -0,002
    2         8       1,00     1,00     0,14     0,33    -0,015
  CP average for  facade n° 2  -0,008

    3         9       0,00     0,30     0,00     0,10    -0,003
    3        10       0,00     1,00     0,00     0,33    -0,020
    3        11       1,00     0,30     0,33     0,10    -0,002
    3        12       1,00     1,00     0,33     0,33    -0,019
  CP average for  facade n° 3  -0,011

    4        13       0,00     0,30     0,00     0,10    -0,004
    4        14       0,00     1,00     0,00     0,33    -0,003
    4        15       1,00     0,30     0,14     0,10     0,000
    4        16       1,00     1,00     0,14     0,33     0,000
  CP average for  facade n° 4  -0,002

    5        17       0,00     0,00     0,00     0,00    -0,027
    5        18       0,00     1,00     0,00     0,14    -0,019
    5        19       1,00     0,00     0,33     0,00    -0,036
    5        20       1,00     1,00     0,33     0,14    -0,015
  CP average for  facade n° 5  -0,024
```

Figura 19 – Arquivo de texto contendo os coeficientes de pressão.

Fonte: Grosso (1995)

Apesar da variedade de métodos para determinação dos coeficientes de pressão, as limitações da cada um deles fazem com que sejam aplicáveis apenas a casos específicos, seja em função da orientação, da forma ou da complexidade dos elementos arquitetônicos envolvidos. Uma maneira bastante eficaz para determinar o coeficiente de pressão é através da confecção maquetes físicas para ensaios em túneis de vento ou da modelagem virtual para a simulação em CFD. Ambos os métodos permitem o detalhamento dos elementos arquitetônicos da fachada, do entorno, bem como da forma de edificações que apresentam planta complexa (não-retangular) e/ou em qualquer orientação.

2.7 Legislação e normas.

A Norma Brasileira 15220-3 (ABNT, 2005) recomenda para a Zona Bioclimática n° 8, que compreende 53,7% do território nacional e abrange a cidade de Natal/ RN, o uso da ventilação por meio de aberturas voltadas para a orientação dos ventos predominantes e com área útil superior 40% da área de piso do ambiente. Apesar de reconhecer a importância da ventilação, a Norma apresenta maior foco na determinação das propriedades térmicas dos sistemas construtivos da envoltória. Não há recomendação sobre o tipo de esquadria ou elemento vazado mais adequado; sugestão de utilização de captadores de vento ou elementos defletores, bem como informações referentes à perda de carga causada por venezianas ou qualquer outro elemento que obstrua a passagem do ar. Também não são citados os valores de taxa de ventilação e de renovação do ar suficientes para a satisfação dos índices de conforto.

O Código de Obras de Natal, Lei Municipal nº 055/2004 (NATAL, 2004), classifica os cômodos da edificação em de uso prolongado, transitório e especial. Além disto, apresenta o dimensionamento mínimo de área, largura e pé-direito dos ambientes, visando proporcionar condições satisfatórias de higiene, salubridade e conforto. O pé-direito mínimo é praticamente constante nos ambientes residências de permanência prolongada, com variação inferior à 5%. A largura mínima varia de 1,80m à 2,60m, e a área é a dimensão com maior diferença, variando de 4,00 m² à 10,00 m² (Tabela 6). Nota-se que o maior ambiente mínimo residencial de uso prolongado é a sala e o local de trabalho e estudo, ambos com 10,00 m² de área, largura de 2,60 m e pé-direito de 2,5 m.

O Código de Obra recomenda que as aberturas para ventilação devam ser voltadas para áreas externas à edificação e orientadas considerando os pontos cardeais. As áreas externas à edificação compreendem os logradouros, os pátios e os recuos maiores do que 1,5 m. A observância dos pontos cardeais sugere, mais não deixa explicito, que a orientação das aberturas deve atentar para a direção da ventilação predominante. Para os cômodos de uso prolongado é

exigida área de abertura superior à 1/6 da área de piso e nos ambientes de menor permanência esta relação cai para 1/8.

Tabela 6 – Dimensionamento mínimo proposto pelo Código de Obras de Natal, RN com destaque para os ambientes residenciais de uso prolongado.

Ambiente	Área mínima (m²)	Dimensão mínima (m)	Pé-direito mínimo (m)
Sala	10,00	2,60	2,50
Quarto	8,00	2,40	2,50
Cozinha	4,00	1,80	2,50
Banheiro	2,40	1,20	2,40
Banheiro de serviço	2,40	1,00	2,40
Lavabo	1,60	1,00	2,40
Quarto de empregada	4,00	1,80	2,50
Área de serviço	-	1,00	2,40
Garagem residencial	12,50	2,50	2,40
Locais de estudo e trabalho	10,00	2,60	2,50
Loja	12,00	2,80	2,70
Mezanino	-	-	2,40

Fonte: (NATAL, 2004) adaptado

Considerando que as dimensões mínimas são largamente utilizadas pelos arquitetos é possível afirmar que tais medidas são compatíveis com as primeiras fases projetuais, pois atende aos anseios do empreendedor em ter o maior número de unidades por lote e são aplicáveis para as edificações disponíveis no mercado imobiliário residencial.

2.8 Predição da ventilação natural

A ventilação natural de uma edificação pode ser estimada, basicamente, por cinco maneiras. São elas: os modelos algébricos, os modelos empíricos, os experimentos, as medições e as simulações em CFD. O modelo algébrico é tido como o método mais tradicional para predição do desempenho da ventilação. Este método ainda é amplamente utilizado em virtude do embasamento teórico do fenômeno físico e da baixa necessidade de recursos computacionais. Porém, tais modelos tendem a apresentar um grau de incerteza considerável, principalmente quando aplicados em situações complexas. Desta maneira, são mais indicados para os casos de baixa complexidade e com o objetivo de estimar a ordem de grandeza das variáveis.

Os modelos empíricos baseiam-se em medições ou em simulações para estimar os coeficientes presentes nas equações dos modelos algébricos, simplificando-as. Desta maneira, os modelos empíricos não diferem muito dos algébricos: funcionam bem para os casos específicos dos quais são resultantes, porém, apresentam aplicabilidade reduzida. Mesmo com as limitações pertinentes, os modelos empíricos são comumente adotados por manuais técnicos, pois representam economia de tempo e de custo, com razoável grau de precisão.

Os experimentos em túneis de vento com modelos em escala reduzida permitem verificar o comportamento da ventilação em condições reais quando as forças ascensionais não são de grande intensidade. Porém, experimentos em escala reduzida dificilmente apresentam os mesmos parâmetros adimensionais pertinentes aos casos reais, tais como os números de Reynolds, de Grashof[5] e de Prandtl[6]. Isto pode reduzir a representatividade dos resultados, principalmente quando há fenômenos térmicos envolvidos. Há maneiras de simular os efeitos da confecção, mas isto implica, geralmente, na adoção de fluidos de densidade diferente da do ar. Os resultados obtidos em estudos experimentais são utilizados na calibração e validação de modelos matemáticos que compõem os códigos de CFD. Contudo, a utilização de túneis de vento apresenta questões de custo e de tempo a serem consideradas (CHEN, 2004).

---

[5] O Número de Grashof - Gr é um número adimensional da mecânica dos fluidos, que fornece a relação entre a sustentação de um fluido em relação à viscosidade, definido algebricamente por:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

Onde:
g é aceleração da gravidade (m/s²)
β é o coeficiente de dilatação térmica (K^{-1})
Ts é a temperatura da superfície (K)
T_∞ é a temperatura de referência (K)
L é o comprimento característico (m)
v é a viscosidade (m²/s).

[6] O número de Prandtl - Pr é um número adimensional da mecânica dos fluidos, que fornece a relação entre a viscosidade e difusividade térmica, definido algebricamente por:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Onde:
v é a viscosidade (m²/s)
α é a difusividade térmica (m²/s)

As medições *in loco* ou em laboratório com modelos em escala real são utilizadas na aferição do desempenho da ventilação, com a vantagem de apresentar resultados mais precisos em relação aos obtidos com modelos em escala reduzida. Tais medições tornam-se necessárias quando a variação da ventilação externa precisa ser considerada. Nas medições *in loco*, o controle das características do fluido é praticamente impossível, por isso se faz necessário a realização de medições em dias e horários distintos, para que os dados não resultem de condições climáticas adversas. A confecção de modelos em escala real implica em um custo elevando e a confiabilidade os dados medidos é função da qualidade do equipamento de medição utilizado, da manutenção e da experiência do operador.

Os modelos multi-zona de estimativa da taxa de renovação são aplicáveis para as edificações condicionadas naturalmente ou artificialmente. Estes modelos baseiam-se nas equações de balanço de massa, de energia e do momento desenvolvidas pela termodinâmica. A complexidade destas equações exige a adoção de considerações sobre as variáveis envolvidas, visando tornar a solução exequível. Contudo, a adoção de considerações equivocadas sobre as variáveis pode implicar em erros significativos no resultado final. Os modelos multi-zona são capazes de estimar com maior facilidade o desempenho geral da ventilação em edificações compostas por vários ambientes. O resultado desta avaliação geral pode ser utilizado na pré-configuração da simulação em CFD de cada zona. A integração de diversos métodos de estimativa da ventilação tende a reduzir as incertezas resultantes das deficiências de cada método. Além disto, a comparação com os resultados obtidos por um método consolidado é frequentemente utilizada para validar um método proposto.

Os modelos multi-zona tendem a não apresentar resultados satisfatórios para ambientes de grande dimensão, onde normalmente há considerável gradiente de temperatura ou de velocidade do ar. Nestes casos, a simulação computacional é mais adequada, pois trabalha a partir da divisão do ambiente em pequenos volumes, denominados células, nas quais são desenvolvidas as equações de termodinâmica. O cálculo em cada célula permite a análise da distribuição das

variáveis em ambientes não uniformes. A simulação em CFD trata da solução de um conjunto de equações diferenciais parciais, tais como: conservação da massa, do momento e da energia, a concentração de componentes químicos e a turbulência. A simulação de CFD aplicada ao ambiente construído vem sendo utilizada em estudos de qualidade do ar, de conforto térmico, de prevenção à incêndio e de desempenho de sistemas de climatização. O interesse pelo CFD cresceu bastante nos últimos anos em razão da redução dos custos, tanto dos computadores de alto desempenho quanto dos programas de simulação. A constante melhoria na interface dos *softwares* de CFD, tornando-os mais amigáveis ao usuário, tende a reduzir o tempo de processamento e a exigência de conhecimentos avançados de mecânica dos fluidos. A vantagem do CFD, frente aos demais modelos, é a determinação dos campos de velocidade, de pressão, de temperatura e de concentração de poluentes em todo o ambiente. O grau de incerteza das predições depende da qualidade dos dados de entrada e das considerações adotadas pelo operador. A união da simulação de CFD e de desempenho termo-energético incrementa substancialmente a representação do fenômeno real (CHEN, 2008).

2.9 Estimativa da ventilação natural

Os modelos empíricos de predição da ventilação são úteis por permitir uma rápida estimativa inicial das taxas de renovação do ar e da velocidade interna, todavia a aplicação deve atentar para as limitações (ALLARD, 2002). Há centenas de modelos empíricos desenvolvidos para estimar o desempenho da ventilação (CHEN, 2008). Os modelos mais simples fazem uso de equações que consideram o coeficiente de descarga da abertura, a velocidade do vento na altura de interesse, a área afetiva da abertura e os coeficientes de pressão sobre as fachadas.

Toledo (1999) e Bittencourt (2005) descrevem uma equação para estimar a Taxa de Renovação - Tr em função da diferença de pressão nas aberturas (Equação 7). Esta equação torna-se especialmente útil no tratamento de dados resultantes de simulações computacionais, onde a aferição da pressão é facilmente obtida.

$$Tr = Cd \times Aw \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} \times \frac{3600}{vol}$$ **Equação 7**

Onde:

Cd é o coeficiente de descarga da abertura.

Aw é a área efetiva das aberturas de entrada e saída (m²).

DP é a diferença de pressão nas aberturas (Pa)

ρ é a massa volumétrica do ar (kg/m³).

Vol é o volume do ambiente (m³)

Lamberts, et. al. (2000) apresentam equações para estimar a taxa de renovação de ar proporcionada pela ventilação unilateral ou cruzada, quando as aberturas encontram-se em fachadas opostas. A taxa de renovação para a ventilação cruzada é dada pela Equação 8

$$Tr = \frac{Cd \times Aw \times Vz \times \sqrt{\Delta Cp} \times 3600}{Vol}$$ **Equação 8**

Onde:

Cd é o coeficiente de descarga da abertura.

Aw é a área efetiva das aberturas de entrada e saída (m²).

Vz é a velocidade do vento na altura da abertura (m/s).

Δ **CP** é a diferença dos coeficiente de pressão entre a abertura de entrada e saída.

Vol é o volume do ambiente (m³)

Cada termo desta equação remete a equações auxiliares. Para o coeficiente de descarga, convencionou-se que 0,6 é um valor satisfatório para quantificar a perda de carga característica das aberturas retangulares localizadas no centro da parede, tipicamente adotadas na arquitetura. A área efetiva das aberturas e dado pela Equação 9, que relaciona as aberturas de entrada e de saída e o ângulo de incidência. Deve-se corrigir a área útil para ventilação de acordo com o tipo de esquadria: janelas deslizantes e guilhotina, por exemplo, apresentam área útil em torno de 50% da área total ocupada na fachada. A área útil da abertura de entrada deve ainda ser corrigida pelo cosseno do ângulo de incidência.

$$\frac{1}{Aw^2} = \frac{1}{(A'_{entrada} \times \cos\theta)^2} + \frac{1}{A'^{\,2}_{saída}}$$ **Equação 9**

Onde:

A' é a área útil da abertura para ventilação (m²).

θ é o ângulo de incidência, formado entre a direção do vento predominante e a normal da fachada, em graus.

A velocidade do vento, obtida em estações climatológicas, geralmente é medida a 10 metros de altura. A correção dos dados de velocidade é feita pela Equação 10, que considera a alteração no perfil de velocidade causado pelo sítio e a cota da abertura.

$$Vz = V_{10} \times K \times Z^A$$ **Equação 10**

Onde:

$\mathbf{V_{10}}$ é a velocidade medida a 10 metros de altura (m/s).

K e **A** são constantes relativas ao sitio.

Z é a altura onde encontra-se a abertura (m)

As constantes K e A são obtidas na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficiente de pressão do vento para loteamentos.

Localização da edificação	K	A
Campo aberto plano	0,68	0,17
Campo com algumas barreiras	0,52	0,20
Ambiente urbano	0,40	0,25
Centro da cidade	0,31	0,33

Fonte: (LAMBERTS, et al., 2000)

O autor sugere uma maneira simplificada para estimar a diferença de coeficiente de pressão em fachadas opostas, conforme foi explicado no item 2.6.2.

A taxa de renovação para a ventilação unilateral é dado pela Equação 11, que considera apenas a área da abertura de entrada e a velocidade na altura da abertura.

$$Tr = \frac{0,025 \times A' \times Vz \times 3600}{Vol}$$ **Equação 11**

Onde:

A’ é a área útil da abertura para ventilação (m²)

Vz é a velocidade do vento na altura da abertura (m/s).

Vol é o volume do ambiente (m³)

Comparando a Equação 8 com a Equação 11, percebe-se que a taxa de renovação da ventilação unilateral tende a apresentar valores bem inferiores. O fato pode ser constatado aplicando-se as equações em um modelo com as dimensões mínimas descritas pelo Código de Obras de Natal (Tópico 2.7), com abertura de entrada na fachada Leste medindo 1,67 m de largura por 1,0 m de altura e peitoril de 1,1m e no caso da ventilação cruzada, abertura de saída na fachada Oeste com as mesmas dimensões da abertura de entrada. Através dos dados de velocidade e orientação do vento, obtidos no arquivo climático de referência[7] de Natal, é possível estimar a taxa de renovação para todas as horas do ano, considerando a ventilação unilateral (Figura 20) e a cruzada (Figura 21). Verifica-se que na ventilação unilateral a taxa de renovação média oscila em torno das 5 trocas por hora, na ventilação cruzada a taxa de renovação média fica entre 50 e 150 trocas por hora. Mesmo considerando as limitações envolvidas neste método de predição fica evidente que a ventilação cruzada apresenta taxas de renovação bem mais expressivas que a ventilação unilateral.

[7] O arquivo climático de referência, também conhecido por TRY, sigla em inglês para *Test Reference Year*, é a tabulação anual das variáveis climáticas medidas hora a hora de um ano típico. A adoção do arquivo climático de referência é explicada no tópico 4.2 deste trabalho.

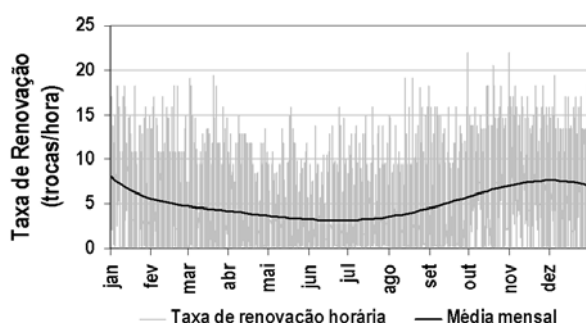



Figura 20 – Gráfico da taxa de renovação anual de ventilação unilateral.

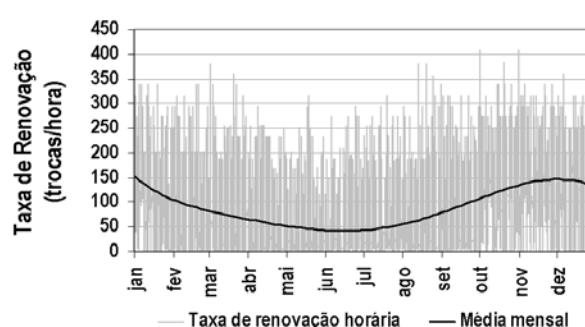



Figura 21 – Gráfico da taxa de renovação anual para ventilação cruzada.

Fonte: Elaborado a partir de Lamberts, et al. (2000)

A velocidade média do ar dentro do ambiente com ventilação cruzada pode ser estimada pela equação proposta por Givonni, (ALLARD, 2002), que adota a velocidade externa como referência e leva em consideração a razão entre a área da abertura e a área da parede na qual está locada (Equação 12). Esta grandeza é normalmente descrita na bibliografia como WWR, sigla em inglês para *window to wall ratio*.

$$V_i = 0{,}45 \times \left(1 - e^{-3{,}48y}\right) \times V_r$$ **Equação 12**

Onde:

$\mathbf{V_i}$ é a velocidade média interna (m/s).

y é a razão entre a área da abertura e a área da parede na qual está locada

$\mathbf{V_r}$ é a velocidade externa de referência (m/s).

O autor recomenda o uso da equação para ambientes de planta quadrada e aberturas de entrada e de saída com áreas iguais. Além destas limitações, a equação desconsidera a orientação da fachada de entrada, o leiaute interno e o coeficiente de descarga das aberturas. Aplicando a equação no modelo descrito anteriormente, verifica-se que a velocidade média ocorre com maior freqüência entre 0,2 e 0,3 m/s, com picos de 0,7 m/s (Figura 22). Estes valores são compatíveis com a as recomendações da ASHRAE, que sugere a velocidade interna máxima de

0,8m/s. Contudo, deve-se atentar que além da aparente superficialidade, a estimativa através de médias desconsidera o gradiente e a amplitude dos dados.

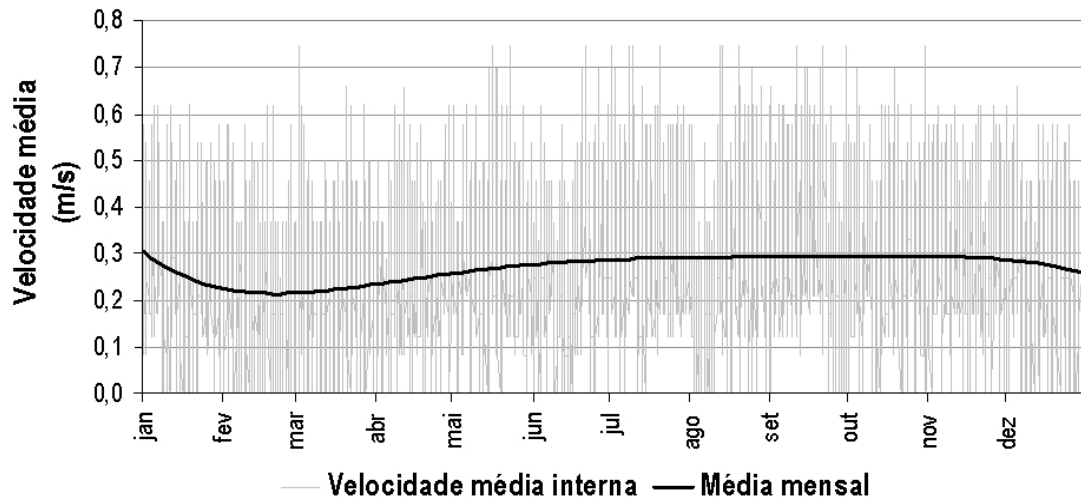



Figura 22 – Gráfico do aproveitamento anual da velocidade do ar externo.
Fonte: Elaborado a partir de Lamberts, et al. (2000)

O teste de sensibilidade da Equação 12, através da aplicação de valores crescentes de WWR, revela maior ênfase para as variações iniciais (Tabela 8 e Figura 23). Ou seja, aumentando o vão da abertura de 10% para 40% da área da fachada, a velocidade média aumenta mais de 20%, enquanto que no intervalo de 40% para 100%, a melhoria na velocidade média interna é inferior à 10%.

Tabela 8 – Aproveitamento da velocidade do ar externo.

WWR	V_i/V_r
10%	13,2%
20%	22,6%
30%	29,2%
40%	33,8%
50%	37,1%
60%	39,4%
70%	41,1%
80%	42,2%
90%	43,0%
100%	43,6%

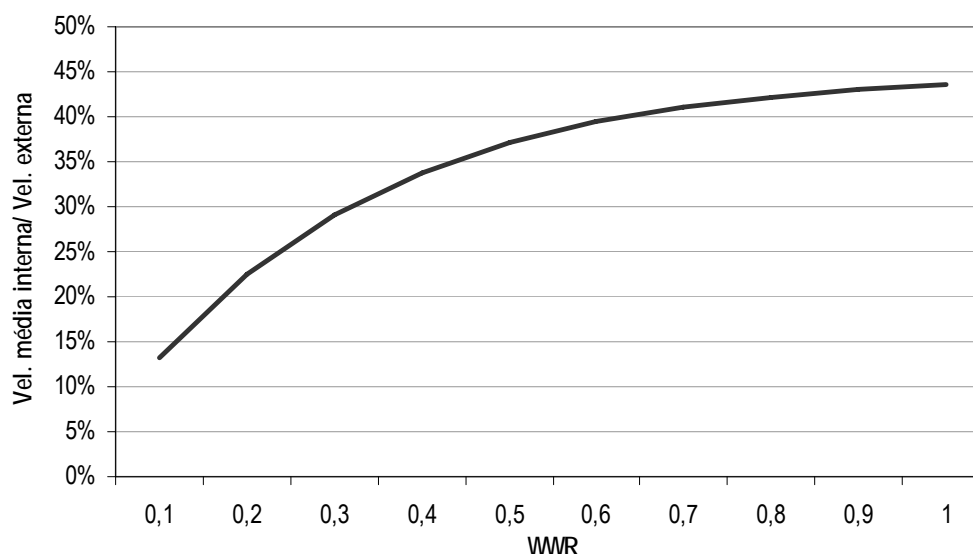



Figura 23 – Gráfico do aproveitamento da velocidade do ar externo.

2.10 Simulações computacionais

A simulação computacional de edificações compreende os programas de avaliação do desempenho termo-energético e os de escoamento de fluidos. Os recursos computacionais vêm sendo usados para estimar o comportamento térmico e energético de edificações desde a década de 70, estimulados pela crise de energia. Há diversos programas cujos algoritmos simulam fenômenos de transferência de calor e de massa, de mecânica de fluidos e de psicrometria.

Comparado aos experimentos realizados em túnel de vento, a simulação computacional tende a apresentar maior praticidade na obtenção dos resultados, além da flexibilidade para realizar estudos paramétricos. Estima-se que os custos de uma simulação sejam inferiores aos testes em túneis de vento, principalmente se for considerada a infra-estrutura necessária para a realização dos experimentos em ambos os métodos. Apesar dos avanços tecnológicos, as simulações apresentam incertezas que podem proporcionar resultados nem sempre fidedignos à situação real. As incertezas podem ser decorrentes da escolha equivocada do modelo matemático que representa o fenômeno físico, da simplificação da geometria da envoltória ou da caracterização das condições de contorno.

2.10.1 Simulação computacional de Fluidos

O surgimento dos programas de CFD é atribuído à indústria aeroespacial nas décadas de 1960 e 1970. Atualmente são utilizados em diversas áreas, como na indústria automobilística, naval, de manufaturados; astrofísica, meteorologia, oceanografia, etc. A engenharia e arquitetura são campos mais recentes de aplicação desta ferramenta (TRINDADE, 2006).

Os códigos utilizados pelos programas de CFD baseiam-se em diferentes métodos para resolver as equações de escoamento de fluidos. O mais comum é a técnica dos volumes finitos, no qual a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões denominadas volumes de controle. Assim, as equações são discretizadas[8] e resolvidas interativamente em cada volume de controle resultando em uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos no interior do domínio.

A simulação computacional é uma alternativa mais acessível do que os testes em túneis de vento, por demandar menor infra-estrutura e dispensar a confecção de maquetes físicas. Além disto, os *softwares* consomem menos energia, não demandam custos de manutenção mecânica, permitem que toda a operação seja realizada por apenas um usuário, não demandam equipe de apoio e apresentam diversas maneira de visualização dos resultados através de imagens, vídeos, tabelas, gráficos, dentre outras.

Os programas de CFD são desenvolvidos, normalmente, para diversas aplicações que envolvem o escoamento de fluidos. Por um lado, este caráter generalista permite sua utilização em várias situações que envolvem a dinâmica de fluidos, mas por outro lado, deixa a cargo do usuário a responsabilidade de configurar muitas das variáveis necessárias para caracterizar e analisar o fenômeno de acordo com o objeto de estudo. A solução de problemas envolvendo dinâmica dos fluidos requer do usuário não só a habilidade de configurar a ferramenta, mas também de

---

[8] Discretizar é a escolha, dentro de um conjunto de equações, de uma que atenda a um critério previamente estabelecido.

compreender os fenômenos físicos envolvidos e um bom entendimento das soluções numéricas. O ajuste da simulação envolve decisões que devem ser tomadas em função do nível de complexidade e dos resultados esperados para cada estudo. A simulação em CFD pode ser direcionada para o estudo da ventilação externa e/ ou interna. A simulação da ventilação externa permite estimar o transporte de poluentes e o conforto dos usuários no meio urbano (LIDDAMENT, 2006). Nos estudos de ventilação interna, as principais aplicações são voltadas para a análise da qualidade do ar, da ventilação artificial, dos sistemas de exaustão, dos riscos de incêndio e do conforto térmico.

A falta de integração da simulação computacional ao processo projetual consiste numa barreira para a aceitação desta ferramenta na prática arquitetônica. Os programas de CFD, de maneira geral, não são direcionados para o processo projetual arquitetônico, diferentemente ao que ocorre com os programas CAD. Assim, a simulação é utilizada principalmente para testar a proposta final, confirmando o sucesso ou fracasso das escolhas adotadas. (MORBITZER, et al., 2001).

2.10.2 O *software* ANSYS CF-x

O ANSYS CF-x (ANSYS, 2007) é um *software* de CFD que utiliza tanto a técnica dos elementos finitos como a dos volumes finitos na simulação do escoamento de fluidos e é estruturado em cinco estágios (Figura 24). O primeiro estágio, denominado Pré-processador, trata da modelagem do objeto, do domínio e a configuração da malha. A modelagem pode ser feita através das ferramentas CAD do programa ou por meio da importação de sólidos gerados em outros *softwares*. O *software* dispõe da opção de geração automática de malha, que ajusta a malha ao modelo, refinando-a nas regiões de maior complexidade e espaçando-a sobre superfícies extensas. Esta opção permite economia significativa de tempo nas simulações, sem que haja perda de qualidade no resultado. Quando a malha é configurada pelo operador há a tendência de gerá-la demasiadamente refinada em regiões que não carecem de tanta atenção.

O próximo estágio, denominado *Pré-solver*, trata da configuração das variáveis pertinentes ao fenômeno físico, tais como: as condições de contorno, o material das superfícies, o tipo de fluido e suas propriedades, as reações envolvidas, os modelos de turbulência e os parâmetros de convergência. Em seguida a simulação é processada, que de acordo com o fabricante, acontece em dois estágios: o processo de cálculo e o gerenciador de cálculo. Durante esta etapa, não há intervenção do usuário. O estágio final consiste na leitura do resultado através de imagens, tabelas e gráficos. O programa apresenta um variado conjunto de saída visual dos dados que podem ser lidas isoladas ou combinadas entre si, tais como, vetores, linhas de percurso (*linhas de fluxo*), superfícies de contorno e animações.

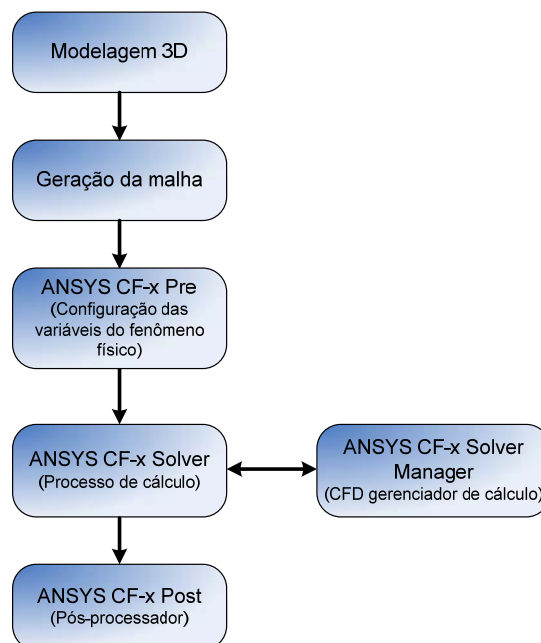



Figura 24 – Fluxograma de funcionamento do *software* ANSYS CF-x.
Fonte: Elaborado a partir de Ansys (2006a)

2.10.3 Modelos de turbulência

O tempo de processamento e as incertezas de uma simulação estão fortemente ligados ao modelo de turbulência adotado. Os dois métodos mais explorados na bibliografia são: a Simulação Numérica Direta - DNS e os Modelos de Turbulência Aproximada que divide-se em Reynolds-médio Navier Stokes - RANS e a Simulação de Grandes Vórtices - LES.

O método DNS soluciona, sem aproximações, as equações de Navier-Stokes, o que requer definições de malha bastante refinadas, o suficiente para que os menores vórtices sejam computados. Logo, mesmo para pequenas edificações, facilmente se chega a malhas na ordem de 10^{11} células. Computadores de alto desempenho podem manipular definições na ordem de 10^{8}. Portanto, é possível afirmar que o modelo DNS é pouco viável para simulações de ventilação natural.

A solução numérica de turbulência pode ser obtida através de valores médios de velocidade. Este procedimento é utilizado pelo modelo LES em seu processo de aproximação. Trabalhos realizados mostram que o modelo LES é capaz de simular ventilação interna com sucesso (TAN, 2005). Todavia, o LES exige bastante afinidade com o comportamento da turbulência e experiência com simulações numéricas, além de necessitar de computadores de alto desempenho e apresentar elevado tempo de processamento.

As equações de Navier-Stokes para escoamentos transientes abrangem a turbulência, mas são muito complexas para soluções práticas. Em vários casos, é possível obter resultados satisfatórios reduzindo estas equações. O modelo RANS trata da solução das equações reduzidas resultantes das equações que são complexas demais para serem solucionadas na íntegra. Segundo TAN (2005), a comparação com o modelo DNS ou com o LES, mostra que o RANS tende a ser mais simples e apresenta maior rapidez de convergência para a simulação da ventilação natural. A opinião sobre o modelo de turbulência mais eficaz é controversa entre os autores. Enquanto que Tan (2005) defende o modelo RANS, Chen (2008) afirma que o modelo LES é superior ao RANS por possuir apenas um coeficiente empírico, ou, em alguns casos, nenhum coeficiente empírico.

Dentre os modelos de turbulência RANS, destacam-se o K-ε padrão e o K-ε RNG, que foram desenvolvidos a partir de escoamentos turbulentos básicos e com alto número de Reynolds. O modelo k-e padrão é o mais utilizado para o cálculo do escoamento por ser considerado robusto, econômico e de razoável precisão, mas apresenta falhas na predição da separação do

escoamento em condições de não-equilíbrio do entorno. A separação do escoamento tem influência sobre o desempenho de difusores, lâminas e corpos aerodinâmicos, bem como na transferência de calor e nos fenômenos que acontecem com mudança de fase. A otimização do desempenho de máquinas exige a escolha de modelos capazes de predizer com precisão a separação do escoamento. Em algumas aplicações, isto pode ter conseqüências perigosas, como, por exemplo, na predição do arraste nas asas de aviões (ANSYS, 2006b).

A simulação do escoamento de ar em ambientes internos é caracterizada por baixos números de Reynolds, o que, a princípio, tornaria inaplicáveis tais modelos. Todavia, estudos mostram que o uso dos modelos K-ε padrão e o K-ε RNG apresentam resultados satisfatórios para a simulação da ventilação natural interna (ROSA, 2001). Além disto, os modelos de turbulência desenvolvidos para baixos números de Reynolds exigem um refinamento demasiado da malha e são específicos para cada caso.

2.10.4 Condições de contorno

As condições de contorno definem a velocidade e direção do vento a serem adotadas na simulação da ventilação natural. Os dados de ventilação podem ser obtidos em estações climatológicas ou através do arquivo climático de referência. Contudo, deve-se considerar a interferência do entorno circundante. A malha urbana condiciona o fluxo de ar a seguir a direção das vias, por apresentarem menor resistência a passagem do vento. Quanto maior for o adensamento urbano, maior será a interferência sobre a ventilação. A aferição da interferência do meio circundante pode ser estimada através de medições de campo ou em túneis de vento. A representatividade dos resultados de uma simulação é dependente das condições de contorno adotadas (OCHOCINSKI, 1997).

A prática projetual tende a tratar a ventilação de maneira estática e constante. A própria rosa dos ventos, isolada das interferências do entorno, perde representatividade, visto que a orientação e a velocidade do ar são afetadas pela malha urbana. Além disto, a implantação dos ambientes no terreno deve considerar a orientação de vento no período em que a ventilação é

mais necessária, pois é preferível ter ventilação no período diurno do verão ao invés do período noturno do inverno. Portanto, o projetista que pretende elaborar edificações naturalmente ventiladas deve obter dados confiáveis de velocidade e direção do vento (CHEN, 2004). Estes dados podem ser obtidos em estações climatológicas, que geralmente estão instaladas em centros de pesquisa, universidades e demais instituições públicas ou em órgãos militares. Todavia, os dados nem sempre são acessíveis, seja por motivos de segurança ou da política institucional, ou são pouco confiáveis, o que ocorre quando o equipamento é utilizado e/ou operacionalizado de maneira inadequada.

Considerando a dinâmica do vento, é importante conhecer seu comportamento nas escalas macro e micro. A escala macro corresponde aos ‘ventos regionais’, resultantes das correntes atmosféricas globais, e a escala micro trata dos ‘ventos locais’, originados pela alteração dos ventos regionais em função das condições do terreno (CRESESB, 2007). A medição do vento regional é realizada em campo aberto a uma altura suficiente para desconsiderar a interferência do sítio, como ocorre nas estações climatológicas dos aeroportos, normalmente posicionadas entre 10 e 20 metros de altura e onde o entorno apresenta-se minimamente ocupado. Os dados obtidos nestas estações permitem traçar o perfil geral do vento na região e são válidos para os locais próximos e de configuração de sítio semelhante.

Os dados tendem a perder representatividade em locais distantes dos pontos de medição ou densamente urbanizados (CRESESB, 2001) e devem ser corrigidos para que possam ser utilizados no nível das edificações. A correção pode ser feita algebricamente ou através da comparação com dados coletados *in loco*. Os dados de vento local devem ser medidos na altura em que se deseja ter conhecimento do fluxo de ar e são úteis na caracterização de uma área específica, como um lote ou uma quadra. A coleta de dados locais pode ser feita por amostragem e podem ser utilizados como um parâmetro de correção para os dados regionais.

Os dados climáticos são, por convenção, medidos em intervalos horários, por se este um um período compatível com a inércia da temperatura do ar. Porém, há variáveis climáticas que são

mais dinâmicas e a medição horária pode levar à considerações incipientes sobre o fenômeno real. Enquadram-se nesta categoria: a radiação solar direta, fortemente influenciada pela presença de nuvens e a velocidade e direção do vento, que variam constantemente.

A escolha do intervalo de medição para determinada variável deve considerar também as características técnicas do equipamento e a quantidade de dados necessários para descrever o fenômeno medido. Os equipamentos eletrônicos e os *softwares* de banco de dados minimizam as limitações técnicas e dão mais liberdade ao pesquisador na escolha do intervalo mais conveniente, podendo ser horário para as variáveis de maior inércia e com menor intervalo para as variáveis mais dinâmicas. Por fim, deve-se considerar que a incerteza de dados fornecidos por terceiros depende da perícia de quem realizou as medições.

2.10.5 Análise de resultados

A apresentação dos resultados das simulações pode ocorrer de diversas maneiras e varia conforme o *software* utilizado. As formas mais freqüentes de apresentação gráfica são os vetores, os campos e as linhas de percurso, que correspondem a pressão, velocidade e *fluxo* (Figura 25 a Figura 27).

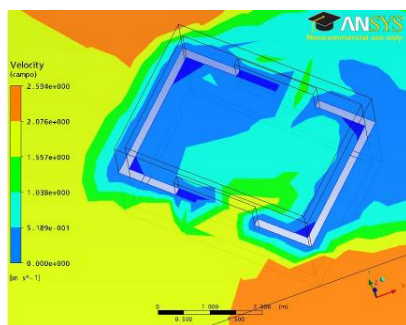



Figura 25 – Representação através de campo de velocidade à meia altura da janela.

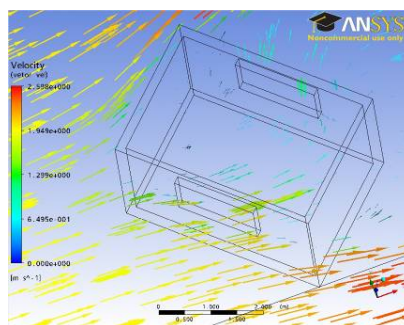



Figura 26 – Representação da velocidade por vetores à meia altura da janela.

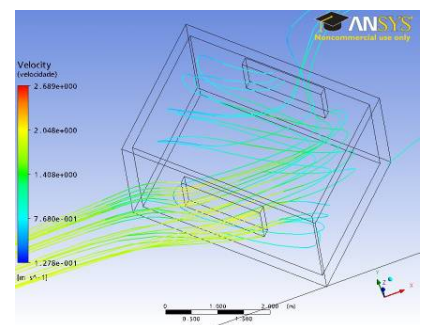



Figura 27 – Representação do escoamento por linhas de fluxo.

A representação em três dimensões é bastante didática, pois demonstra visualmente as informações do fluxo de ar. Os campos de velocidade são úteis para avaliar a distribuição interna

do fluxo de ar (ASFOUR;GADI, 2007), porém são pouco representativos na avaliação da direção do escoamento. Os campos de pressão são especialmente úteis para avaliar a distribuição dos coeficientes de pressão sobre as fachadas e aberturas, que é essencial no cálculo do potencial de uso da ventilação, bem como na determinação das zonas de baixa pressão, onde há pouca circulação de ar.

Os vetores permitem a visualização das zonas de maior ou menor intensidade do fluxo, de formação de vórtices e de aceleração ou perda de velocidade do ar. Contudo, deve-se atentar para a quantidade de vetores na imagem: o excesso pode deixar a leitura confusa e a escassez tende a mascarar os resultados, levando à conclusões precipitadas. Uma maneira comumente adotada para concentrar os vetores em locais específicos atrapalhar a compreensão da imagem é a adoção de um plano de referência, porém o entendimento pode ser prejudicado, pois perde-se a noção da origem e destino dos vetores que compõem o plano de referência.

As linhas de fluxo são linhas que representam o percurso do escoamento e, semelhante aos vetores, permitem a aferição do fluxo de ar ao longo do domínio com melhor descrição dos vórtices. A disposição adequada das linhas de fluxo é necessária para facilitar o entendimento da imagem.

As saídas gráficas são visualmente interessantes, pois permitem a aferição qualitativa da ventilação. Todavia, as saídas numéricas são mais eficazes para a análise e síntese dos resultados. Normalmente os dados numéricos são disponibilizados em arquivos de texto ou em tabelas para serem manipulados externamente em *softwares* específicos.

3 METODOLOGIA

De acordo com o referencial teórico apresentado, a ventilação é induzida por uma diferença de pressão nas aberturas e o fluxo de ar se desenvolve ao longo dos espaços vazios no interior da edificação que conectam estas aberturas. Portanto, a análise das alternativas voltadas para a promoção da ventilação natural em níveis satisfatórios em um projeto ou mesmo num esboço deve

considerar tanto a distribuição de pressão sobre a envoltória quanto à conformação dos espaços internos. O conhecimento da distribuição de pressão sobre a envoltória permite verificar a orientação e a posição mais adequada para a locação das aberturas nas fachadas. O dimensionamento das aberturas visa prover área suficiente para satisfazer as necessidades de ar dos usuários.

A divisão dos mecanismos que induzem a ventilação facilita a compreensão dos pesos que cada um deles possui, e atende aos casos nos quais o projetista tem pouca autonomia sobre alguma das variáveis. Conhecendo a influência que as decisões tomadas terão no ambiente construído é possível minimizar situações indesejáveis, tais como: ventilação interna insuficiente para prover conforto e qualidade do ar ou velocidade do vento acima dos padrões recomendados, o que prejudica a execução das atividades de leitura e trabalho. Contudo, deve-se considerar o grau de incerteza imposto pelos métodos de predição e pela variação climática.

A metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa baseava-se, inicialmente, na simulação de modelos representativos da fase de esboço, sob diferentes combinações de tamanho de abertura e de condições de contorno. O objetivo seria avaliar a influência de cada variável no desempenho da ventilação. Conhecendo-se o grau de atuação das variáveis seria possível estabelecer uma lista de prioridades a serem atendidas desde a fase inicial do processo projetual visando potencializar o uso da ventilação natural. Porém, durante o desenvolvimento da pesquisa, a metodologia precisou se ajustar as limitações impostas, principalmente, pela operacionalização do *software*. Paralelamente aos ajustes da metodologia em função das simulações computacionais, foram estimadas as taxas de renovação através dos métodos de cálculo simplificado, apresentados no item 2.9 a fim de comparar os resultados com os modelos simulados. Deste modo, a metodologia utilizada neste trabalho ficou definida pela comparação de indicadores da ventilação natural, obtidos por dois métodos distintos, com o objetivo de traçar recomendações compatíveis com as primeiras fases do processo projetual para potencializar o uso desta estratégia.

O Grupo de Pesquisa Conforto Ambiental e Eficiência Energética/ UFRN -CNPq passou por uma mudança em sua plataforma de simulação computacional de fluidos, adotando o TAS (EDSL, 2008a) no lugar do *Phoenics* (CHAM, 2005), que deixou de ser utilizado em razão do término da licença, cuja renovação mostrou ser muito dispendiosa e incompatível com os recursos disponíveis. Após os testes iniciais, verificou-se que o TAS apresentava limitações para a simulação da ventilação natural, tais como: simulação apenas em duas dimensões, impossibilidade de inserção de objetos isolados e a obrigatoriedade em discriminar o fluxo mássico nas aberturas de entrada e saída. Dentre as limitações, a modelagem bi-dimensional foi a principal razão para a adoção de uma nova plataforma de simulação, capaz de gerar resultados em três dimensões. O ANSYS CF-x (ANSYS, 2007) demonstrou ser um programa mais adequado, pois além de frequentemente citado na bibliografia, apresentava custo de aquisição permanente bem inferior à renovação da licença anual do *Phoenics*.

O aprendizado do CF-x ocorreu através dos tutoriais do próprio programa e em fóruns na internet. A interface é bem mais amigável se comparado ao *Phoenics*, principalmente o módulo de modelagem - *Design Modeler* - que conta com comandos similares aos programas CAD. Todavia, ambos exigem elevado grau de conhecimento de mecânica dos fluidos para a adequada determinação dos coeficientes necessários para a simulação. A dificuldade de convergência característica do *Phoenics* se repetiu no CF-x. O gerador automático de malha contido no programa mostrou ser pouco eficaz em proporcionar resultados satisfatórios nas simulações realizadas, o que exigiu o ajuste manual e empírico da malha, semelhante ao que acontecia no *Phoenics*.

Ultrapassada a etapa inicial de familiarização com os comandos do programa, o processo de aprendizagem concentrou-se no ajuste das simulações para obter convergência satisfatória. A revisão dos artigos revelou que os parâmetros adotados para a confecção da malha e para determinação dos coeficientes necessários à simulação costumam ser suprimidos. A falta de referências obrigou a determinação empírica destas variáveis, baseada em testes preliminares. Os

testes preliminares mostraram que a presença de objetos de pequena dimensão força o refinamento da malha, aumentando o numero de células no domínio e tornando a elaboração da malha mais complexa. Em razão disto, desconsiderou-se a espessura da parede ao redor da abertura que passou a fazer parte do mesmo plano da fachada.

Outras limitações foram identificadas durante o processo de aprendizagem e de ajuste dos modelos. A dificuldade de convergência forçou à alteração nos objetivos iniciais da pesquisa, que se proponha a simular a ventilação em diferentes modelos representativos dos ambientes tipicamente residenciais, além de utilizar velocidades e direções do vento características do clima local. Algumas variáveis tiveram de ser desconsideradas ou simplificadas com o objetivo de reduzir a quantidade de simulações ou mesmo para torná-las viáveis ou exequíveis.

3.1 Definição dos modelos para a simulação

3.1.1 Dimensão do ambiente

A definição dos modelos é baseada no Código de Obras de Natal, Lei Municipal nº 055/2004 (NATAL, 2004). Adotou-se as dimensões mínimas sugeridas para a sala e o local de trabalho e estudo. Conforme descrito no Item 2.7, área do ambiente deve ser de 10,00 m², a largura mínima deve ser de 2,40 m e o pé-direito de 2,50 m.

3.1.2 Aberturas

As relações de aberturas são baseadas nas recomendações do Código de Obras de Natal e na NBR 15220 (ABNT, 2005). De acordo com a Norma Brasileira, Natal/ RN está inserida na Zona Bioclimática nº 8 para a qual é recomendada grandes aberturas para ventilação. A área mínima de abertura regulada pelo Código de Obras é 1/6 da área de piso, o que corresponde a pouco mais de 16%. Tanto o Código de Obras quanto a Norma Brasileira dimensionam as aberturas em função da área de piso, mas, com diferentes percentuais, conforme descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação do dimensionamento de aberturas.

Área de piso (m²)	Fração da área de abertura Código de obras	Área de abertura NBR 15220
10,00	1/6 da área de piso (ou ≈16,7%)	Pequenas aberturas: 10% < A < 15%
		Aberturas médias: 15% < A < 25%
		Grandes aberturas: A > 40%

Fonte: Elaborado a partir do Código de Obras (NATAL, 2004) e da NBR 15220 (ABNT, 2005).

A recomendação de área mínima para ventilação do Código de Obras de Natal é próxima ao limite inferior do que a Norma Brasileira classifica como abertura média e bem inferior à abertura grande. Objetivando avaliar o desempenho das recomendações prescritas tanto na Norma Brasileira, quanto no Código de Obras, adotou-se três modelos com diferentes tamanhos de abertura: a pequena com 1,25 m² (Figura 28), a média com 2,00 m² (Figura 29) e a grande com 4,00 m² (Figura 30) respectivamente. Considerando a infinidade de formas possíveis, adotou-se aberturas quadradas em todos os casos, por ser uma forma geométrica regular e recorrente na arquitetura. As aberturas foram posicionadas nas menores fachadas e com fluxo de ar cruzando a sala longitudinalmente.

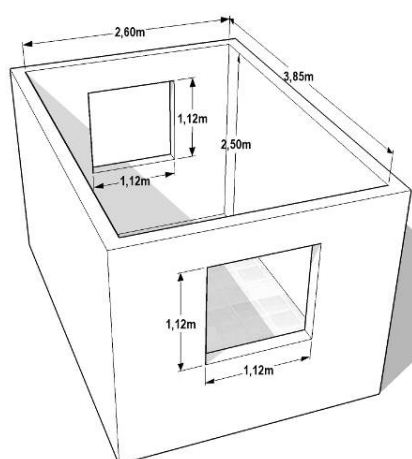
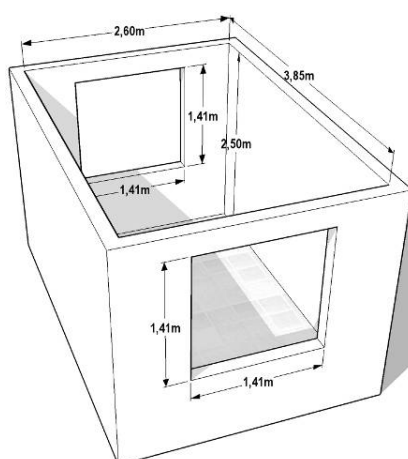
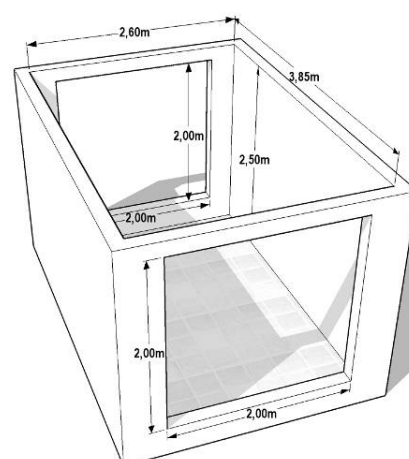



Figura 28 – Modelo 01: abertura pequena. **Figura 29 – Modelo 02: abertura média.** **Figura 30 – Modelo 03: abertura grande.**

3.1.3 Domínio

O domínio consiste em uma caixa com dimensões de 12 x 20 x 7 metros (largura x comprimento x altura) estas dimensões foram adotadas visando compatibilizar dois aspectos imprescindíveis para a simulação: prover um domínio cujas superfícies não interfiram no desenvolvimento do escoamento e com dimensões suficientes para que o número de células não extrapole a capacidade de processamento do *software*. A velocidade de 3,5 m/s empregada nas simulações está de acordo com a análise dos arquivos climáticos, descrita no item 4.2. O fluxo de ar se desenvolve no sentido longitudinal do domínio, com entrada e saída de ar em faces opostas. O modelo foi colocado, inicialmente, com a fachada que contêm a abertura paralela à entrada de ar e com recuo de cinco metros. Para simular as diferentes incidências do vento, girou-se o modelo sobre seu próprio eixo em intervalos de 15º. O critério de convergência adotado seguiu a recomendação contida no tutorial do programa, o qual aponta resíduos inferiores à 5 x 10^{-4} como sendo uma convergência satisfatória para os problemas de engenharia.

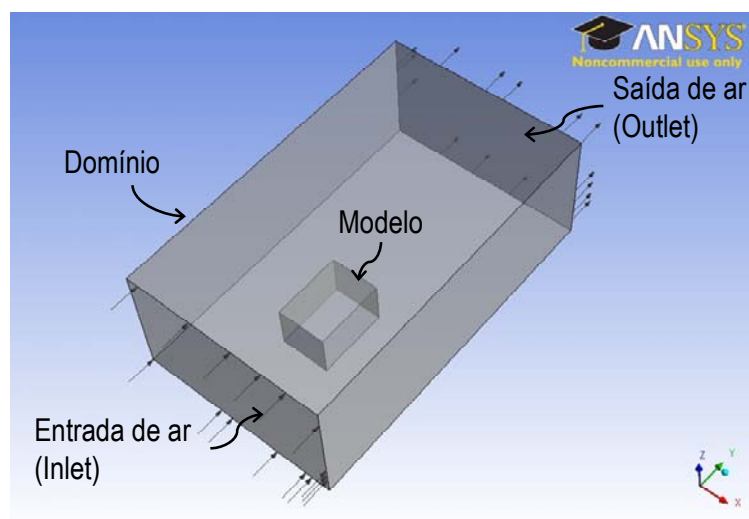



Figura 31 – Exemplo do domínio com o modelo orientado para incidência de 0º

3.2 Critério de avaliação

A avaliação da eficácia da ventilação adotada neste trabalho baseia-se em dois critérios: a taxa de renovação e os coeficientes de pressão nas aberturas, ambos frequentemente encontrados nas referências pesquisada. A taxa de renovação é deduzida através do volume do ambiente e da taxa de ventilação, medida nas aberturas de entrada e saída. Por ser uma grandeza pouco dependente da geometria do ambiente, dos obstáculos existentes e da tipologia das aberturas, a taxa de renovação também pode ser estimada por meio de métodos algébricos, que consideram as dimensões do ambiente e das aberturas. Estimar, ou mesmo aferir, a taxa de ventilação é imprescindível na avaliação da qualidade do ar interno, porém é pouco representativa para quantificar o benefício sobre o conforto dos usuários.

A determinação do coeficiente de pressão sobre as aberturas é essencial para a predição do potencial de uso da ventilação natural nas edificações. Os métodos apresentados no item 2.6 para estimar o coeficiente de pressão possuem, cada um, especificidades que os tornam aplicáveis à casos particulares. A simulação computacional empregada neste trabalho proporcionará a aferição visual e analítica da distribuição de pressão sobre as aberturas. A saída gráfica permitirá verificar o gradiente de pressão sobre as aberturas de entrada e saída e com isto, identificar as zonas mais favorecidas de acordo com a orientação da fachada. A aferição analítica será útil na determinação das incógnitas contidas nos cálculos algébricos. Além disto, os valores resultantes das simulações em diversas orientações permitirão a comparação com os modelos algébricos, descritos no item 2.6.2, para verificar a representatividades destes. Por fim, os resultados da simulação poderão ser trabalhados com vistas à elaboração de recursos para a predição do coeficiente de pressão compatíveis com as primeiras fases projetuais.

4 RESULTADOS

4.1 A prática projetual

A prática profissional necessita de soluções rápidas para as questões projetuais e por vezes passa a simplificar demasiadamente os métodos de análise e síntese de dados. Os projetistas alegam que não dispõem de tempo suficiente para a análise ou que há limitações financeiras, legais e de programa para a aplicação de métodos mais elaborados. Assim, passam a repetir sistematicamente em seus projetos as recomendações básicas aprendidas no curso de graduação. A vivência no Grupo de Pesquisa Conforto Ambiental e Eficiência Energética/ UFRN - CNPq mostrou que na prática a maior parte dos profissionais domina pouco ou nenhum método para a utilização da ventilação natural. Os mais bem sucedidos se valem dos conhecimentos obtidos empiricamente ao longo da carreira, baseado no método das tentativas e erros, ou até mesmo da situação privilegiada da cidade de Natal/ RN, que dispõe de ventilação abundante. Este desinteresse por métodos de predição da ventilação natural é percebido também nos alunos concluintes da graduação, que apesar de ainda estarem no meio acadêmico e terem tido contato com o tema nas disciplinas de Conforto Ambiental, costumam demonstrar certa rejeição à aplicação de métodos analíticos nos seus trabalhos de conclusão de curso. Assim como os profissionais, os alunos demonstram preferência pelos instrumentos gráficos que representam o percurso do vento no entorno e no interior das edificações.

Normalmente a ventilação é utilizada como agente definidor da disposição dos ambientes. Para tanto, considera-se o terreno isolado do meio urbano, a orientação do Norte e a direção predominante do vento regional. Em seguida, é feito um zoneamento no terreno atentando para a disponibilidade de vento, que servirá de base para disposição dos ambientes de acordo com a finalidade, no caso de uma residência: social, serviço ou repouso (Figura 32).

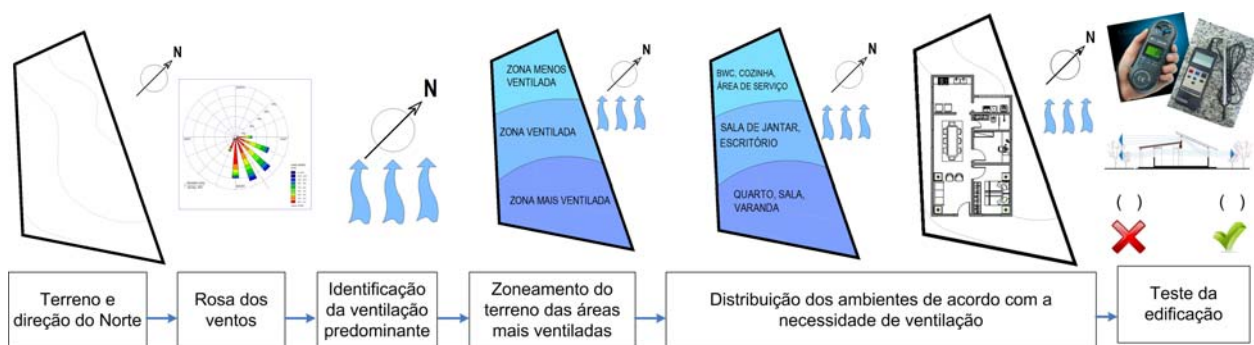



Figura 32 – Síntese da prática usual para contemplação da ventilação natural no processo projetual.

O acúmulo de incertezas decorrente da maneira simplista de tratar a ventilação natural pode implicar em um comportamento do vento na edificação diferente do que foi previsto ou desejado. A análise superficial apresenta limitações, tais como:

- desconsidera a interferência da malha urbana e do entorno imediato ao tratar do terreno isoladamente;
- utiliza apenas a direção predominante como critério, sem atentar para a variação da velocidade e orientação;
- não considera a disponibilidade do vento nas épocas do ano e nos horários adequados;
- desconsidera a interferência no comportamento do vento local decorrente da própria edificação, e
- a avaliação do desempenho ocorre apenas no final do processo, com a edificação já construída, onde a possibilidade de intervenção é praticamente nula.

Além da pouca difusão dos métodos quantitativos, é forte a crença em mitos pouco embasados ou eficazes sobre a ventilação. Os mitos resultam de simplificações equivocadas da teoria e costumam ser repassada informalmente entre os profissionais que preferem o pragmatismo ao invés de conclusões resultantes do processo de análise e síntese. Nota-se que alguns mitos encontram tamanha aceitação que passam a ser considerados premissas para desempenho adequado da ventilação. Um dos mitos mais difundidos entre os projetistas locais

trata da disposição de aberturas de saída maiores do que as de entrada, com o objetivo de garantir ventilação satisfatória. Examinando com um pouco de atenção, percebe-se que a afirmação é bastante genérica, pois não informa sobre a proporção entre as áreas das aberturas e destas com a área de piso ou de fachada. Considerando a dinâmica do fenômeno e a orientação das aberturas é provável que as funções de entrada e saída se alternarem ao longo do dia ou em épocas específicas do ano. A afirmação desconsidera também a possibilidade de controle, visto que o vão livre para a passagem do vento pode ser regulado pela esquadria, gerando diferentes relações entre a área disponível para entrada e saída do ar. Por fim, não fica claro qual o benefício obtido através da aplicação desta recomendação: se corresponde a um incremento na velocidade, na distribuição interna do ar ou na redução da temperatura. Todavia, deve-se considerar que a ausência de recomendações consistentes e aplicáveis ao processo projetual favorece a difusão e aceitação de tais mitos.

A revisão sobre o tema permitiu traçar uma proposta de compatibilização das etapas do processo projetual com as recomendações e as ferramentas correspondentes para potencializar o uso da ventilação natural, distribuídas de acordo com o grau de aprofundamento das etapas (Figura 33). O objetivo desta proposta é mostrar que o desenvolvimento do projeto exige instrumentos compatíveis para atingir os propósitos de cada etapa.

A proposta parte da escala macro, representada pelo meio urbano, e segue em direção à escala micro, que corresponde aos ambientes da edificação. A primeira fase do processo trata do programa de necessidades, onde são conhecidos o terreno e sua localização no meio urbano. O foco desta etapa inicial recai sobre o vento regional e local com o objetivo de caracterizar o comportamento da ventilação, identificar as interferências do entorno, as zonas a barlavento, a sotavento e os períodos de calmaria. Para tanto, sugere-se o uso da rosa dos ventos, dos dados climáticos, de medições no local e, em casos específicos, a simulação computacional do vento regional.

A fase seguinte, denominada de esboço, é a que apresenta maior liberdade formal na busca da organização espacial das necessidades impostas pelo programa. É a fase na qual as modificações na proposta representam custo insignificante, porém com grande interferência no desempenho termo-energético da edificação.

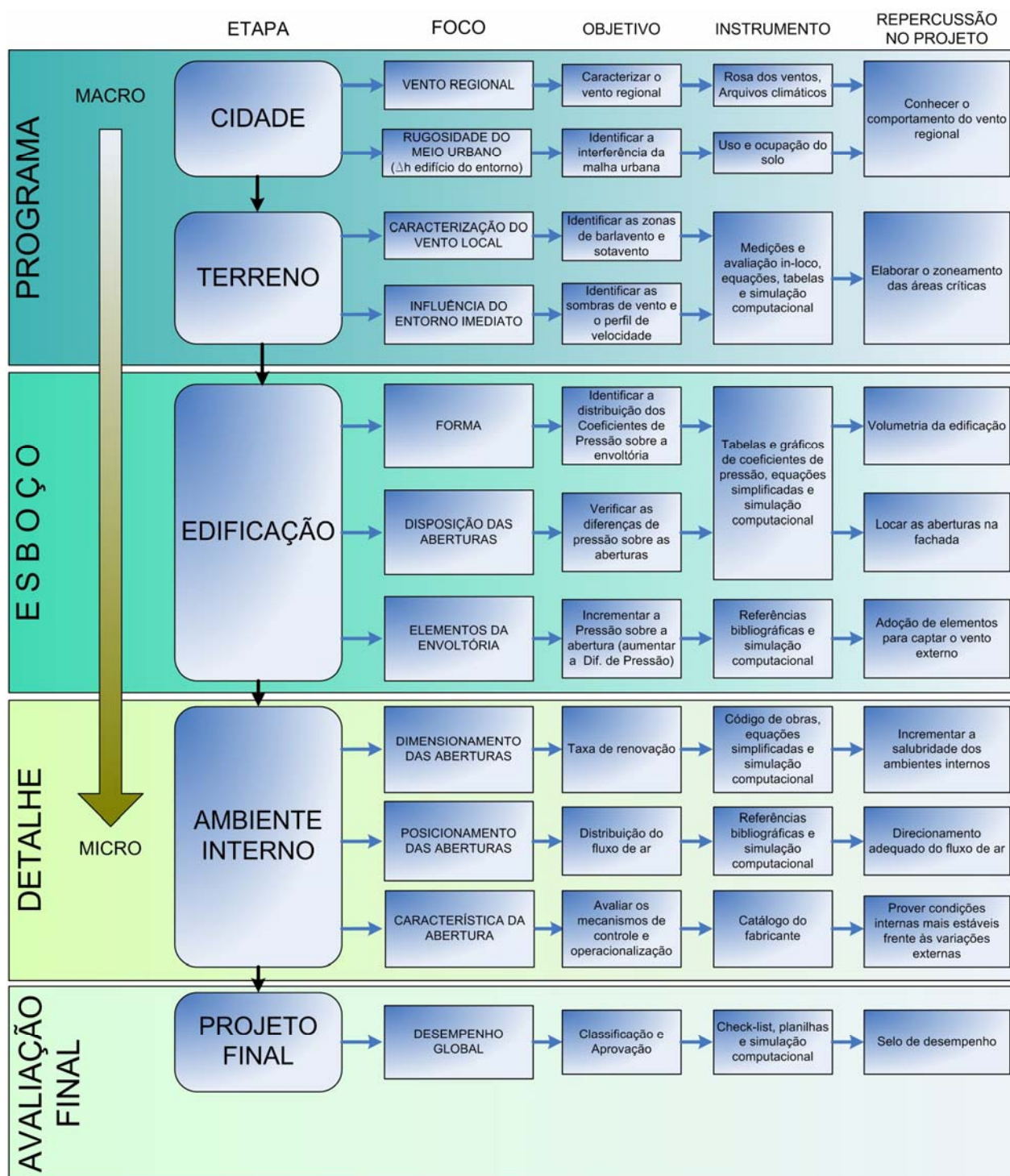



Figura 33 – Proposta de integração da ventilação ao processo projetual.

A orientação e a forma do edifício são normalmente determinadas na fase de esboço e sua interação com as variáveis climáticas é determinante para o desempenho termo-energético. A orientação e a forma possuem forte relação com a distribuição de pressão nas fachadas, que pode

ser quantificada pelo coeficiente de pressão, obtido através de tabelas, gráficos, equações simplificadas ou até mesmo da simulação computacional. Além da forma e das aberturas, os demais elementos da envoltória que interferem na captação do vento costumam ser definidos nesta fase. O correto dimensionamento e orientação destes elementos podem favorecer a diferença de pressão sobre as aberturas, estimulando a ventilação nos ambientes.

Após a conclusão da fase de esboço, parte-se para o detalhamento do projeto, através da elaboração dos desenhos técnicos necessários à aprovação legal e a execução da obra. Esta fase é marcada pelo dimensionamento e locação de todos os elementos que compõem a edificação. A área livre na envoltória para a passagem do vento, resultante do dimensionamento das aberturas, é um fator determinante na renovação do ar interno. Normalmente, o dimensionamento é resultado das especificações de área mínima contidas nos códigos de obra, porém, nem sempre tais especificações são suficientes para dimensionar aberturas capazes de proporcionar a renovação do ar adequada. Ao invés de considerar as dimensões mínimas, o dimensionamento deveria contemplar a necessidade de conforto térmico dos usuários e a disponibilidade de vento local. O cálculo de vazão de ar e a simulação computacional podem ser utilizados para o dimensionamento adequado às necessidades dos usuários.

Enquanto que o tamanho do vão livre tem relação com a taxa de renovação, a posição da abertura condiciona a distribuição do ar no ambiente. Aberturas posicionadas no nível do usuário favorecem a circulação de ar em torno do indivíduo e facilita a troca de calor, o que é bastante benéfico quando a temperatura do ar é inferir a temperatura do corpo humano. Além da troca de calor, a evaporação da umidade da pele induzida pelo fluxo de ar aumenta a sensação de conforto. Todavia, quando a temperatura do ar que adentra o ambiente encontra-se fora dos limites estabelecidos pela zona de conforto o mesmo não deve ser direcionado sobre os ocupantes. Nestes casos as aberturas devem ser posicionadas de modo a permitir a renovação do ar, sem que o fluxo seja direcionado para o nível dos usuários.

Considerando a dinâmica dos ventos, é interessante a adoção de esquadrias que permitam controlar a vazão de ar e direcionar o vento para diferentes porções do ambiente, conforme as atividades desenvolvidas e o leiaute interno. As folhas da janela, por exemplo, podem funcionar como captadores ou defletores, de acordo com a direção do vento. Logo, a esquadria deve dispor de mecanismos, compatíveis com a orientação da fachada, de controle da área livre para a passagem e de direcionamento do vento. Porém, as esquadrias convencionais não costumam dispor dos mecanismos de controle do vão livre, limitando-se aos de abertura. Todavia, tais mecanismos só são eficazes quando os usuários têm interesse e disposição para operá-los e assim ajustar as condições ambientais internas de acordo com suas necessidades e a variabilidade climática. A interação do usuário com a edificação, prevista nos modelos adaptativos é fundamental para a promoção do conforto em ambientes condicionados passivamente. Quando a ventilação é abundante e a abertura é protegida da radiação solar direta, é possível reduzir o nível de sofisticação da esquadria. Neste caso, o mais importante é prover área suficiente para captação do ar externo e favorecer a circulação do vento em torno dos usuários.

A última etapa do processo consiste na avaliação final do projeto para averiguar se os quesitos necessários para prover ventilação adequada foram atendidos. A verificação pode ser realizada através de um check-list, de um ensaio em túnel de vento ou por meio da simulação computacional. A avaliação final pode ser voluntária, com o objetivo de divulgar o desempenho da edificação, ou ser obrigatória quando a legislação exige a classificação de acordo com os selos de desempenho[9].

A escolha da ferramenta a ser utilizada deve considerar as limitações e as incertezas envolvidas. A análise crítica acerca dos dados disponíveis para avaliar o contexto adequadamente e minimizar conclusões equivocadas é imprescindível. Instrumentos e ferramentas que condensam

---

[9] O selo de desempenho, também denominada etiquetagem, é uma maneira de classificar a edificação de acordo com o consumo de energia. É obrigatório em alguns países e encontra-se em fase de implantação no Brasil.

muita informação exigem atenção para que não seja dada demasiada preferência para alguma das variáveis em detrimento das demais. A rosa dos ventos, por exemplo, concentra em uma única representação gráfica todos os dados de velocidade e direção do vento ao longo de um período. Uma rosa dos ventos baseada em dados climáticos horários de um ano qualquer representa 8760 valores de velocidade e direção do vento, ou seja, são mais de 17.000 dados climáticos embutidos numa única figura. A adoção de um ou de poucos valores como referência, mesmo que sejam os de maior ocorrência, certamente representará uma pequena fração do ano. Os dados climáticos tabelados, quando analisados por meio de planilhas eletrônicas, são excelentes fontes para extrair estimativas quantitativas. Porém, a quantidade de dados e a forma de apresentação são pouco familiares à prática projetual, assim como as técnicas necessárias para a obtenção de resultados, que é mais compatível com a pesquisa e as consultorias.

A medição *in loco* é uma forma de conhecer a situação real das variáveis microclimáticas, reduzindo as incertezas pertinentes aos métodos que tratam da correção dos dados climáticos provenientes de estações de referência. Contudo, a aferição exige a prática com o trabalho de campo, com as metodologias de medição, com a utilização dos instrumentos e o discernimento das incertezas envolvidas. A própria aquisição ou locação dos equipamentos nem sempre é possível ou viável. A simulação computacional, conforme ressaltado por diversos autores e constatado na realização deste trabalho, por motivos de operacionalização dos *softwares*, é ainda incompatível com o processo projetual usual e está fortemente ligada às consultorias e aos projetos que envolvem profissionais de diversas áreas.

4.2 Determinação de condições de contorno

A adoção de parâmetros para determinar as condições de contorno de qualquer estudo é passível de questionamento quanto a representatividade, a qualidade e a disponibilidade da base de dados utilizada. Durante o desenvolvimento da pesquisa, pensou-se em adotar o arquivo climático de referência – TRY da cidade de Natal/ RN, por ser uma base de dados consolidada na

simulação do desempenho termo-energético de edificações. Contudo a metodologia utilizada para a seleção dos dados climáticos de 1954 como o ano de referência desfavorece a utilização do TRY como base de dados para o estudo da ventilação. Assim pensou-se em utilizar uma base de dados mais recente, que representasse de maneira mais condizente o comportamento da ventilação na cidade.

Visando obter dados climáticos locais recentes, confiáveis e acessíveis, foram utilizadas as Planilhas da estação climatológica/ solarimétrica (LAVAT-INPE/CRN, 2009) disponibilizadas *on-line* pelo Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro Regional Nordeste/ Natal – LAVAT-INPE/CRN Natal. As planilhas de cada mês de interesse são disponibilizadas individualmente com dados de 2007 até o dia presente. Todavia, algumas planilhas estão incompletas ou mesmo inexistentes, como é o caso do mês de julho de 2008 e da maior parte dos meses de 2007. Logo, optou-se por considerar apenas os anos de 2008 e 2009 por apresentarem menores lacunas de dados.

Comparando os dados de 2008, 2009 e o TRY de 1954, percebe-se que os dois primeiros apresentam valores bem parecidos e diferem um pouco do TRY. Quanto a direção do vento, o TRY apresenta os dados com intervalo de 22,5º, sendo, portanto, pouco sensível às pequenas variações de direção do vento. Aproximadamente 7% dos dados possuem a direção Norte. Porém, cruzando esta informação com os dados de velocidade, percebe-se que é atribuída direção de 0º quando a velocidade do vento é zero, ou seja, na verdade é incorreto afirmar que durante 7% do ano o vento vem de Norte, mas sim que durante este período não há vento. A direção de maior ocorrência, em aproximadamente 23% do ano, é de 112,5º, seguida pelas direções de 90º e 180º, ambas com ocorrência em torno dos 19%, logo seria conveniente afirmar que a direção de 133º, por ser a média aritmética dos valores que mais ocorrem, poderia ser considerada como a direção predominante. Todavia, a direção de 135º, que consta no arquivo climático e que mais se aproxima desta média, não é a que ocorre com maior frequência, respondendo por 12% das horas do ano. Ou seja, a média não condiz com a direção predominante. Os dados climáticos de 2008 e

2009 apresentam a direção média ao longo da hora escolhida e mostram uma distribuição mais harmoniosa dos valores. Em ambos os anos, o intervalo correspondentes aos azimutes de 120º à 149,9º é o que apresenta maior ocorrência, seguido pelo intervalo que vai de 90º à 119,9º. Apesar da semelhança dos dados, percebe-se que a frequência dos intervalos correspondentes aos ângulos de 120º à 209,9º é maior em 2008, enquanto que nos intervalos de 60º à 119,9º é maior em 2009. Contudo, a média dos dois arquivos climáticos mais recentes é em torno dos 135º, como acontece no TRY, mas que neste caso coincide com o intervalo de maior frequência.

Conclui-se que a adoção de um valor único para a direção do vento é complexa e passível de considerações, pois mesmo o intervalo que ocorre com maior frequência representa algo em torno de 1/4 do ano e o valor médio corresponde a uma direção que ocorre, de fato, em pouco mais do que 1% das horas. O mais correto é afirmar que a ventilação ocorre principalmente no quadrante Leste-Sul, que comporta a maior parte do ano nas três bases de dados consideradas.

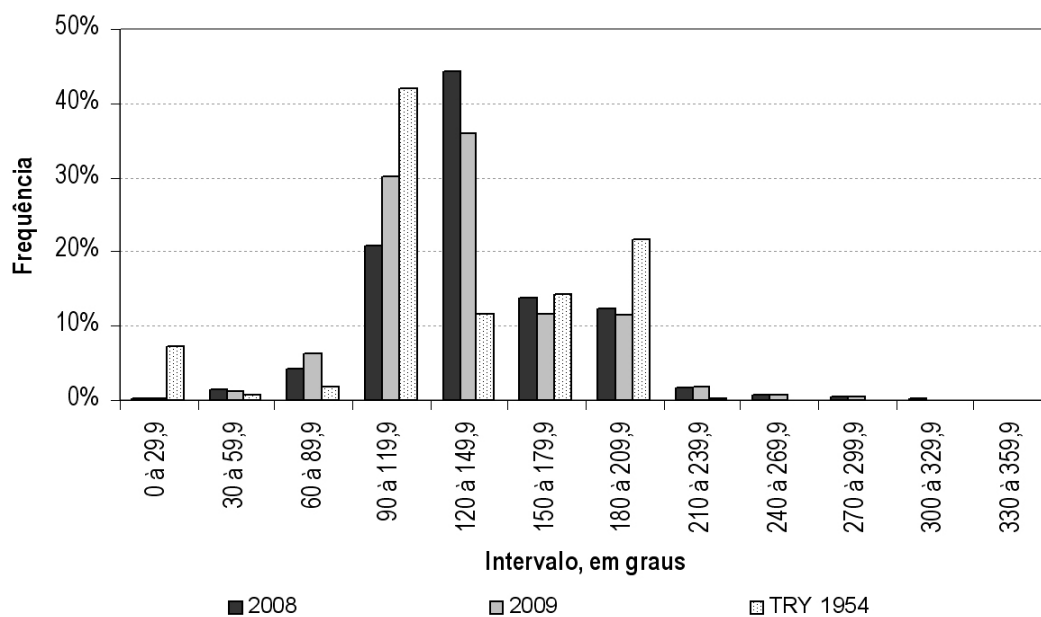



Figura 34 – Gráfico comparativo da ocorrência das direções do vento em Natal/ RN

Quanto à velocidade, os anos de 2008 e 2009 apresentam dados similares entre si e uma sutil diferença em relação ao arquivo climático de referência. No TRY a velocidade máxima é de 9,3 m/s e a média é de 3,4 m/s, porém a velocidade média sobe para 3,6 m/s ao se excluir os

períodos de calmaria. Cruzando os dados de velocidade com os de direção, verifica-se que velocidade média nas direções de maior ocorrência é um pouco maior, variando de 3,7 à 4,0 m/s. Percebe-se, portanto, que as velocidades mais elevadas ocorrem nas direções de maior frequência. Os dados revelam que 2008 apresentou velocidades do vento maiores do que 2009: a velocidade média foi de 4,4 m/s e a máxima foi de 9,5 m/s, contra 4,0 m/s e 8,0 m/s respectivamente no ano seguinte.

Quanto à distribuição em intervalos, no TRY o intervalo de 3,0 à 3,9 m/s responde por algo em torno de 30% das horas do ano, sendo o de maior ocorrência. O intervalo de 2,0 à 2,9 m/s corresponde a aproximadamente um quarto do ano e o intervalo de 4,0 à 4,9 m/s representa pouco mais do que 16% das horas do ano. Os demais intervalos são inferiores à 8%. Assim, o intervalo de 2,0 à 4,9 m/s corresponde a uma frequência próxima dos 70%. Em 2008 e 2009 a distribuição das velocidades é mais harmoniosa, mas com uma sutil diferença entre ambos. Em 2008 o intervalo de 4,0 à 4,9 m/s é o de maior ocorrência, respondendo por pouco menos de um quarto dos dados. Em seguida aparece o intervalo de 5,0 à 5,9 m/s, respondendo por pouco mais de um quinto dos dados, e o intervalo de 3,0 à 3,9 m/s, que corresponde à algo em torno de 18% dos dados disponíveis. Logo, o intervalo de 3,0 à 5,9 m/s abrange 62% dos dados. Em 2009 o intervalo de 4,0 à 4,9 m/s também é o de maior ocorrência, abrangendo um quarto do total, seguido pelo intervalo de 3,0 à 3,9 m/s, com um quinto, é o intervalo de 5,0 à 5,9 m/s, que responde por pouco menos do que um quinto dos dados disponíveis. Similar ao ano anterior, estes três intervalos somados contemplam 65% do total.

Apesar da velocidade média coincidir com o intervalo mais frequente nos três casos, a adoção deste valor como base pode ser questionada, tendo em vista que em todos os casos a média ocorre de fato em um período inferior à 5% dos dados. Em situação semelhante Amar, et. al. (2008) utilizou a distribuição de Weibull para determinar o perfil de velocidade da cidade de Sidi Daoud, Tunísia, visando otimizar a eficiência energética de geradores eólicos. A distribuição de Weibull caracteriza-se por ser uma distribuição de probabilidade contínua, que descreve a chance

que uma variável pode assumir dentro de um conjunto de valores. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CRESESB, 2001) apresenta mapas para estimar a ocorrência de ventos e o fator de forma para todo o país (Figura 35).

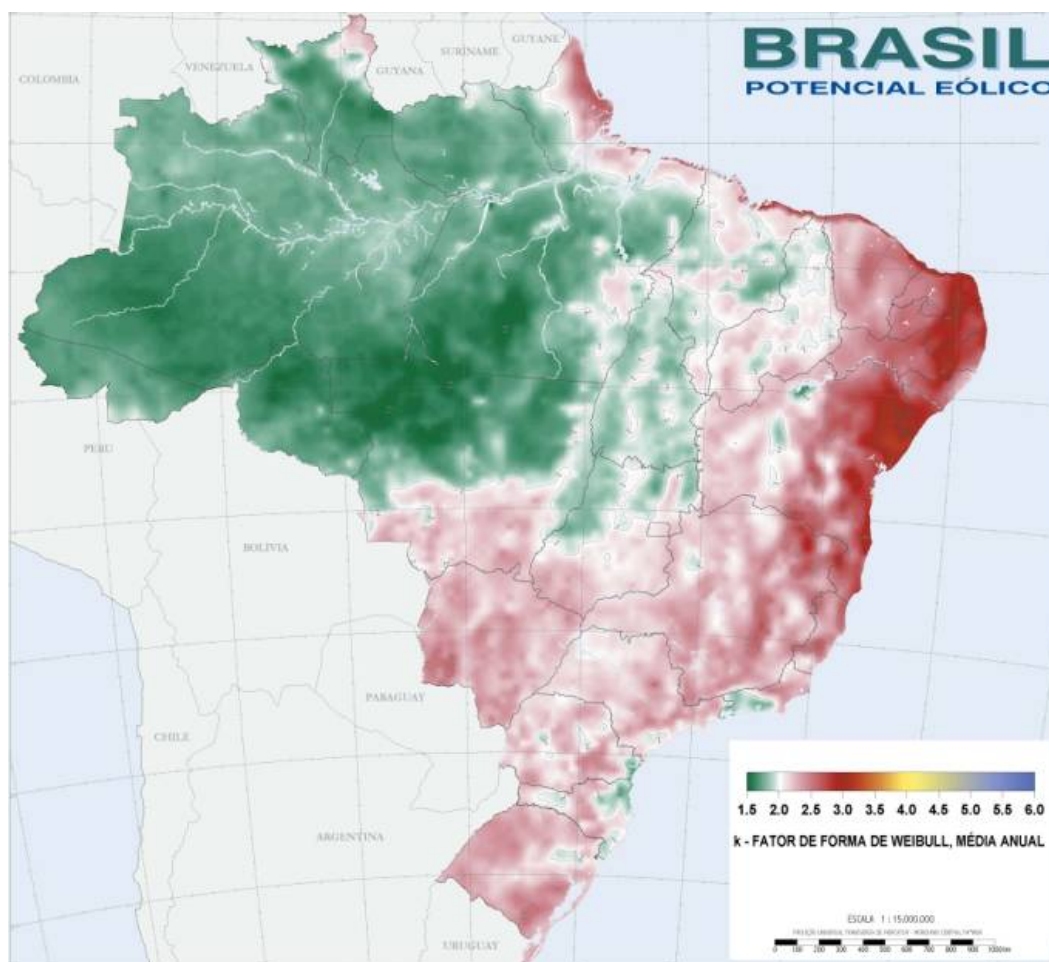



Figura 35 – Mapa do Fator de Forma de Weibull - média anual
Fonte CRESESB (2001)

Aplicando o fator de forma sugerido pelo mapa e utilizando a velocidade média de 2008, obtemos a curva de distribuição Weibull da velocidade. Comparando esta curva com os intervalos de velocidade percebe-se estreita relação com os dados de 2008 e 2009 e um pequeno distanciamento com os dados do arquivo climático de referência.

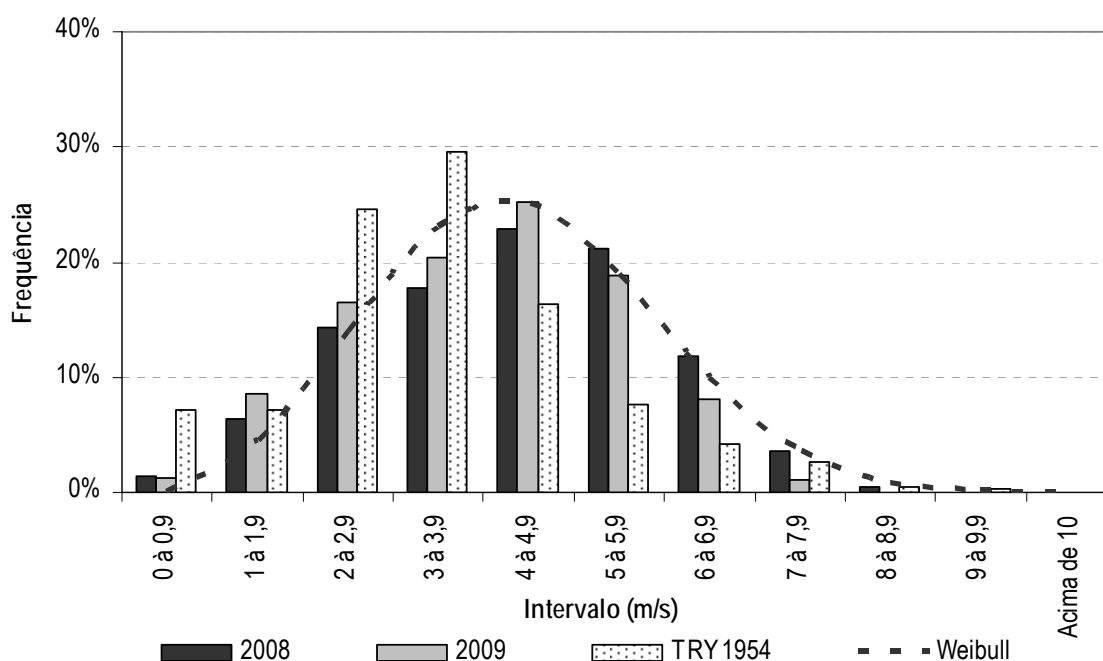



Figura 36 – Gráfico comparativo da distribuição das velocidades entre os dados do arquivo climático e a estimativa do Weibull.

Um estudo conduzido por Trindade (2006) analisando os dados de ventilação coletados na estação climatológica do Aeroporto Augusto Severo, referente ao período de 2002 à 2005, chegou a conclusões semelhantes na busca de parâmetros para a simulação da ventilação natural em galpões. Assim, pode-se considerar a velocidade média do ano de 2008, corrigida para a altura de interesse, como um valor representativo para aplicação em estudos de alternativas gerais, coerentes com as primeiras fases projetuais.

4.3 Determinação das configurações

Na primeira rodada de simulações adotou-se o modelo de turbulência *Shear Stress Transport* – SST que, segundo a empresa que desenvolve o CF-x, apresenta vantagens em relação ao modelo k-e no escoamento do fluxo de ar nas proximidades das superfícies, gerando resultados mais próximos à situação real e com maior rapidez (ANSYS, 2006b). Apesar das vantagens apontadas pelo fabricante, os problemas de convergência ocorreram com freqüência. Os modelos com aberturas em fachadas opostas obtiveram maior sucesso, deixando de convergir

apenas quando o vento incidia paralelo à fachada que continha a abertura. Nos modelos com abertura em apenas uma fachada o índice de sucesso foi menor, apresentando convergência em menos de 36% dos casos.

A simulação dos mesmos casos com o modelo k- ε RNG apresentou taxa de sucesso praticamente igual ao modelo SST, demonstrando que ambos têm desempenho similar. Chen e Srebric (2000) apontam que o k-ε RNG não apresenta precisão satisfatória apenas nos casos onde é considerada a transferência de calor nas proximidades das paredes. De acordo com os autores, as variáveis térmicas na simulação de edificações naturalmente ventiladas são mais bem contempladas através da combinação com *softwares* de desempenho térmico, opinião esta reforçada por Wang e Wong (2008). Como as variáveis térmicas não são consideradas neste trabalho, decidiu-se pela adoção do modelo k-ε RNG em função da frequência de citações na bibliografia pesquisada, que ressaltam a satisfatória precisão na simulação da ventilação externa e interna.

4.4 Ajustes das simulações

Os primeiros modelos testados revelaram a dificuldade em simular a ventilação externa e interna simultaneamente em função da incompatibilidade entre a definição da malha e o critério de convergência. A simulação da ventilação externa exige malha espaçada e compatível com o a dimensão dos obstáculos. Adotar malha refinada para o meio externo torna a simulação inexequível pela grande quantidade de células. A simulação da ventilação interna com malha espaçada é processada com facilidade, mas apresenta resultados incoerentes.

A convergência da simulação da ventilação interna exige uma malha suficientemente refinada para contemplar os menores vórtices. Em contrapartida, há aumento considerável no tempo de processamento e a simulação pode tornar-se instável. Quando a simulação torna-se instável, o tutorial do *software* recomenda que sejam feitas pré-simulações com critério de

convergência maior, reduzindo-o gradativamente até atingir o valor desejado. Assim, a simulação convergente alimenta a seguinte

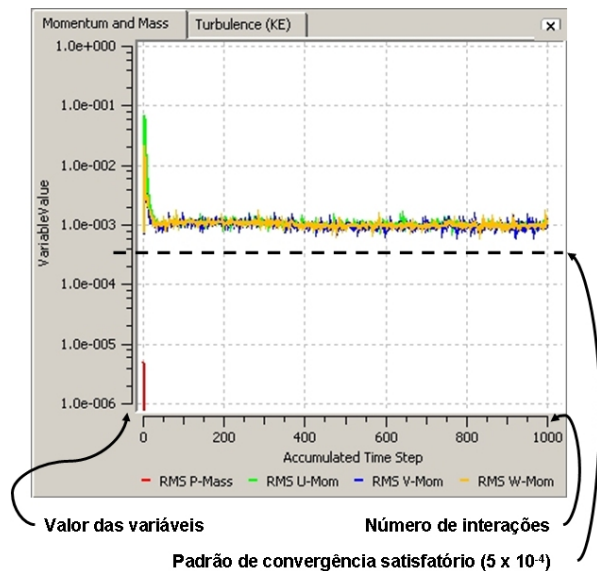



Figura 37 – Gráfico de acompanhamento do desenvolvimento da uma simulação não-convergente.

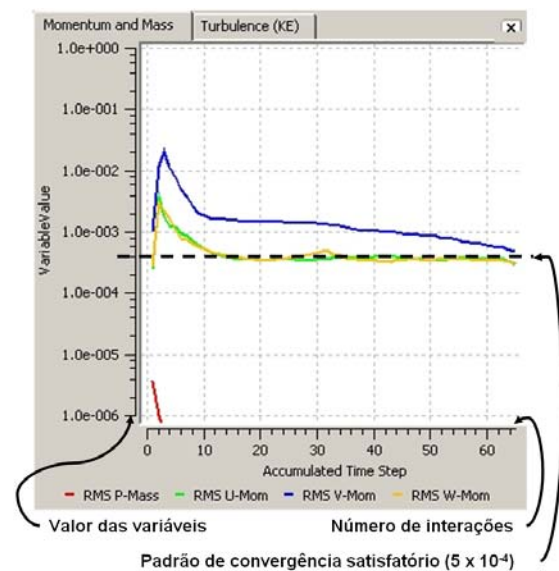



Figura 38 – Gráfico de acompanhamento do desenvolvimento da uma simulação convergente.

O refinamento da malha aumentou significativamente o tempo de simulação dos modelos. As simulações apresentaram-se mais estáveis, mas a convergência estabilizava quando os resíduos chegavam em torno de 7×10^{-4}. O contínuo refinamento da malha passou a fazer pouca diferença na convergência, implicando apenas no aumento no tempo de processamento. Após esgotar a possibilidade de refinamento da malha sem alcançar a convergência, decidiu-se por fazer a modelagem utilizando a ferramenta CAD do próprio CF-X, ao invés de importá-la do AutoCAD.

A modelagem através do módulo CAD do *software* acelerou a convergência nas simulações da ventilação externa. Todavia, ao adicionar as aberturas ao modelo, os problemas com convergência persistiram. Optou-se por realizar as simulações em duas etapas. Na primeira, foi simulado o domínio com o modelo nos 7 ângulos de orientação e com 3 configurações de abertura, resultando em 21 simulações da ventilação externa. Ao término de cada simulação convergida, os resultados de pressão, velocidade e fluxo mássico foram transferidos para uma

planilha eletrônica. A segunda etapa refere-se à simulação interna, na qual os mesmos 21 modelos foram simulados novamente sem o domínio inicial. Nestes casos o modelo passa a ser o domínio e as aberturas tornam-se os *inlet* e *outlet*, que foram configurados de acordo com os resultados da simulação externa. A divisão da simulação em etapas, na qual o operador é quem descrimina quais variáveis serão utilizadas na simulação seguinte, é denominada integração externa e foi utilizada por Trindade (2006) em situação semelhante. Observou-se que as simulações convergiam com maior facilidade para a ventilação externa. A simulação da ventilação interna apresentou dificuldade de convergência ao adotar velocidade e/ou pressão do ar nas aberturas como critério.

4.5 Simulação externa

O desenvolvimento do escoamento no entorno do modelo permite aferir as variáveis de velocidade e pressão de ar nas áreas correspondentes às aberturas. As linhas de fluxo revelam a aceleração vento próximo às arestas e a sombra de vento na porção posterior do modelo (Figura 39). A incidência oblíqua favoreceu a formação de vórtices na região à sotavento do modelo (Figura 40). Os vórtices representam as zonas de recirculação do ar e são caracterizados pelo escoamento turbulento, instável e de difícil definição das variáveis.

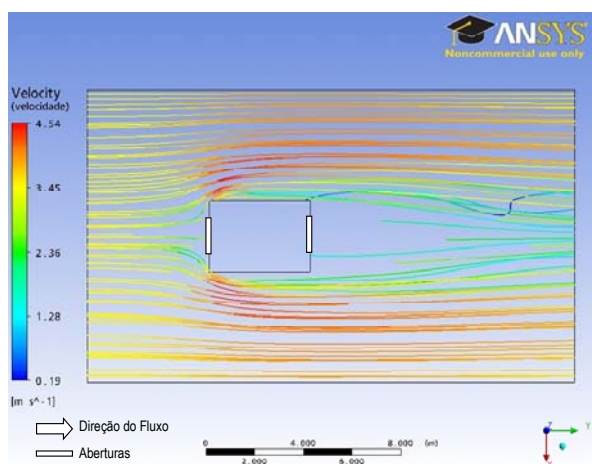



Figura 39 – Linhas de fluxo de velocidade com ângulo de incidência de 0º.

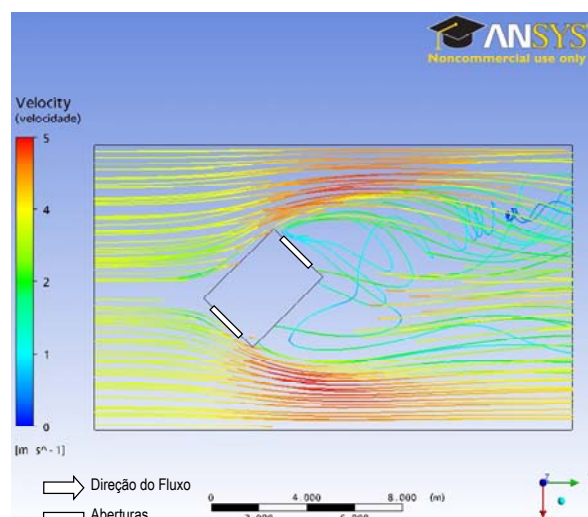



Figura 40 – Linhas de fluxo de velocidade com ângulo de incidência de 45º.

Verificou-se que as zonas de maior e menor pressão concentram-se, respectivamente, nas fachadas à sotavento e à barlavento quando o modelo está posicionado longitudinalmente em relação à direção do fluxo de ar (Figura 41). A incidência oblíqua tende a deslocar as zonas de maior e menor pressão para as quinas (Figura 42). A região de menor pressão formada a sotavento do modelo, que tem maior ênfase na incidência oblíqua, denomina-se sombra de vento. Este região é caracterizada pela baixa velocidade do fluxo e formação de vórtices, conforme verificado pelas linhas de fluxo de velocidade.

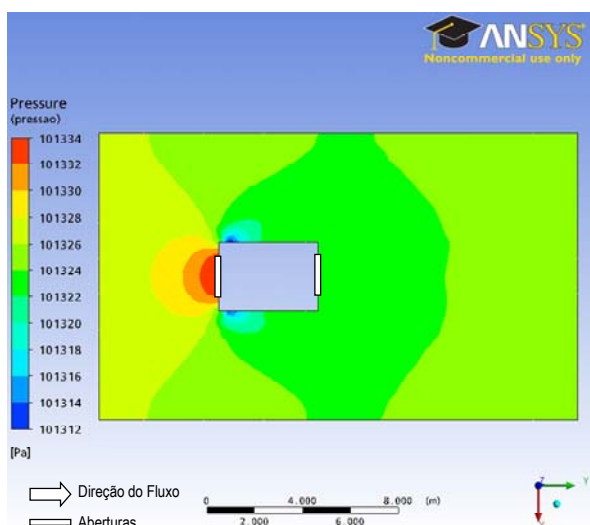



Figura 41 – Campo de pressão à meia altura da abertura com ângulo de incidência de 0º.

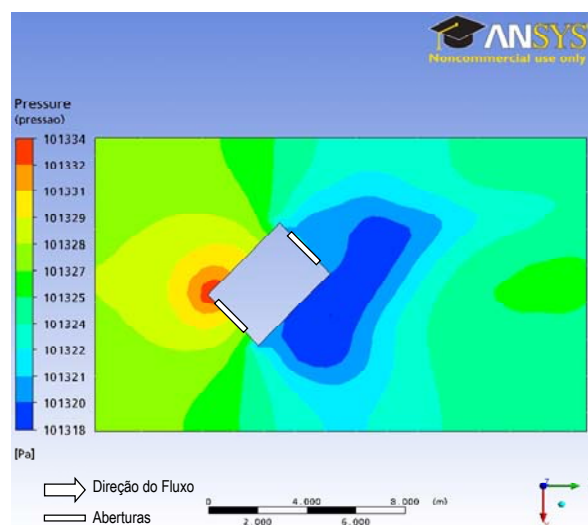



Figura 42 – Campo de pressão à meia altura da abertura com ângulo de incidência de 45º.

A complexidade envolvida na simulação computacional a torna de difícil integração com a prática arquitetônica. Logo, é desejável estabelecer uma maneira acessível de avaliar o impacto das decisões projetuais, mesmo que este método simplificado implique em incertezas. Os métodos algébricos contidos na literatura voltada para projetistas e descritos na revisão bibliográfica são capazes de prover resultados a partir de dados compatíveis com a fase de esboço. A comparação com a simulação computacional permitiu avaliar a representatividade deste método, tendo em vista sua facilidade de aplicação em qualquer etapa do processo projetual, inclusive no dimensionamento e orientação das aberturas.

Os dados de pressão sobre as aberturas resultantes da simulação computacional permitiu determinar, por meio da Equação 7, a taxa de renovação nos modelos em função do ângulo de incidência e da combinação de aberturas. Verifica-se que a taxa de renovação é maior para os menores ângulos de incidência, com pouca alteração no intervalo de 0º à 30º e apresenta valores máximos para a inclinação de 15º. A taxa de renovação reduz com o aumento do ângulo de incidência. Comparando os resultados simulados com os obtidos através do método algébrico descrito pela Equação 8, nota-se estreita similaridade dos resultados, com diferença média inferior à 3% (Figura 43).

Abertura pequena = 1,25 m² Abertura média = 2,00 m² Abertura grande = 4,00 m²

Figura 43 – Gráfico comparativo da taxa de renovação estimada e simulada para diferentes combinações de abertura de entrada e saída.

Adotando o modelo com aberturas pequenas de entrada e saída e comparando-o com as demais combinações de aberturas, verifica-se que a taxa de renovação é crescente a medida que a área efetiva para ventilação aumenta. O aumento médio entre o modelo de referência e o modelo com aberturas grandes de entrada e saída em de 70% (Figura 44). Verifica-se que o caso com entrada pequena e saída grande apresenta melhoria semelhante ao caso com entrada média e saída pequena, o mesmo ocorre nos caso com entrada média e saída grande e entrada grande e saída pequena.

Figura 44 – Gráfico do aumento médio da taxa de renovação em relação ao modelo com aberturas pequenas de entrada e saída.

Aplicando os dados de pressão dos modelos simulados na Equação 5 é possível estimar o coeficiente de pressão nas aberturas para todas as orientações. O Anexo 3 apresenta o resultado das simulações e a ilustração do gradiente de pressão sobre as aberturas. Comparando os valores do coeficiente de pressão médio, percebe-se a que a variação é função, principalmente, do ângulo de incidência, havendo pouca variação em relação ao tamanho da abertura (Figura 45). Entretanto, analisando isoladamente cada tipo de abertura, percebe-se uma amplitude significativa do gradiente de pressão, com maior ênfase na abertura grande. Nota-se que o gradiente de pressão é maior para incidências obliquas e nas zonas a sotavento. (Figura 46, à Figura 48). O gradiente de pressão sobre a abertura é especialmente útil no caso da ventilação unilateral.

Quanto aos valores, na média o coeficiente de pressão é próximo a 1 quando o vento incide perpendicular à abertura de entrada e permanece constante nos primeiros 30º. A partir de então, o coeficiente decresce rapidamente, sendo nulo para a incidência em torno dos 60º. Os menores valores são encontrados quando o escoamento de desenvolve paralelo à abertura e volta a crescer, mesmo que ainda continue com valores negativos, a medida que o ângulo de incidência se aproxima dos 180º.

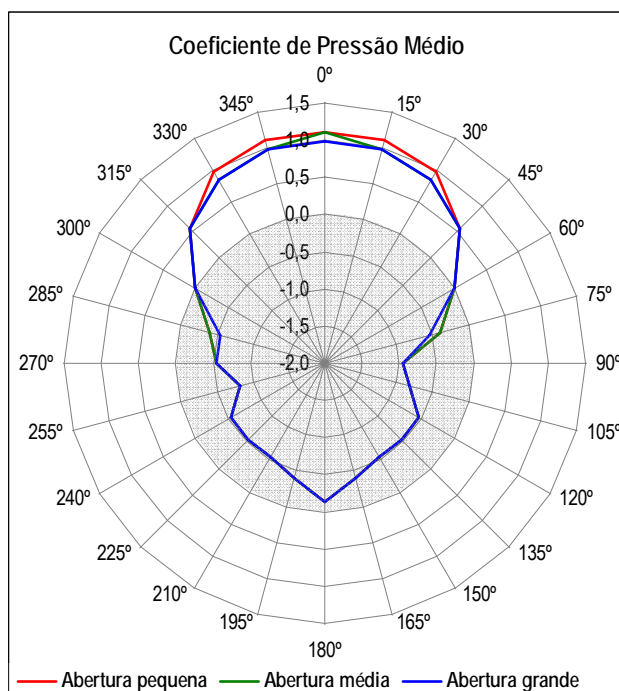



Figura 45 – Gráfico dos coeficientes de pressão médios simulados.

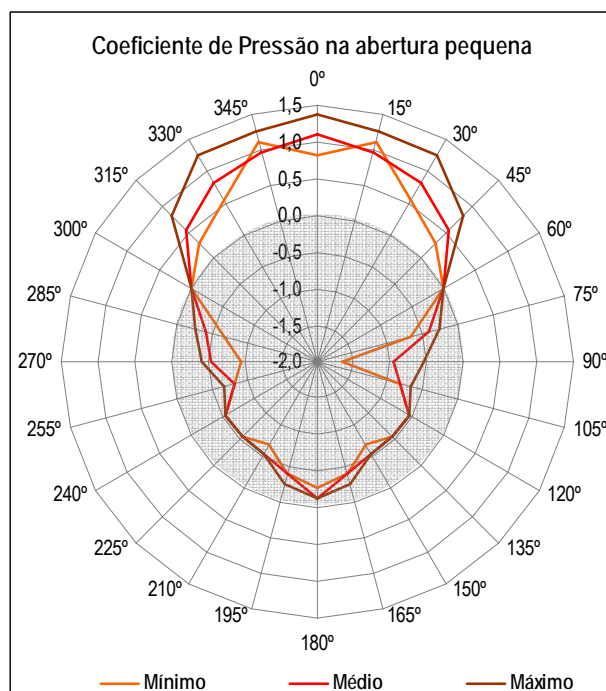



Figura 46 – Gráfico da variação dos coeficientes de pressão na abertura pequena.

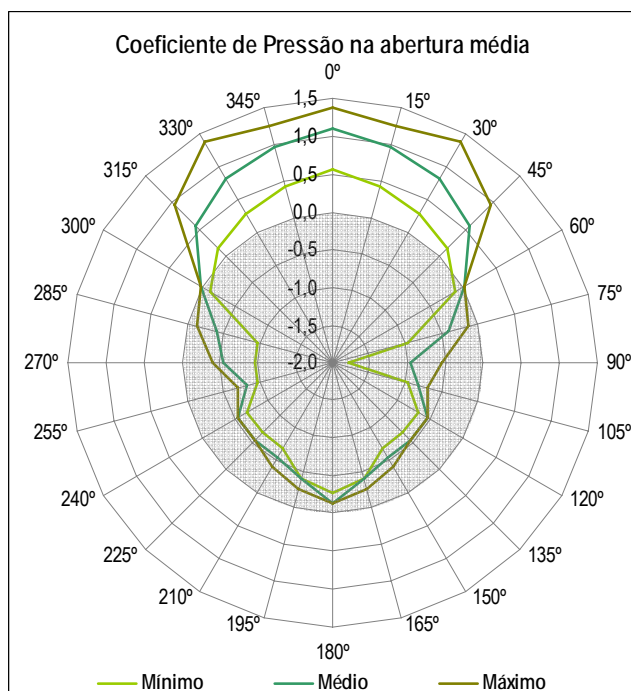



Figura 47 – Gráfico da variação dos coeficientes de pressão na abertura média.

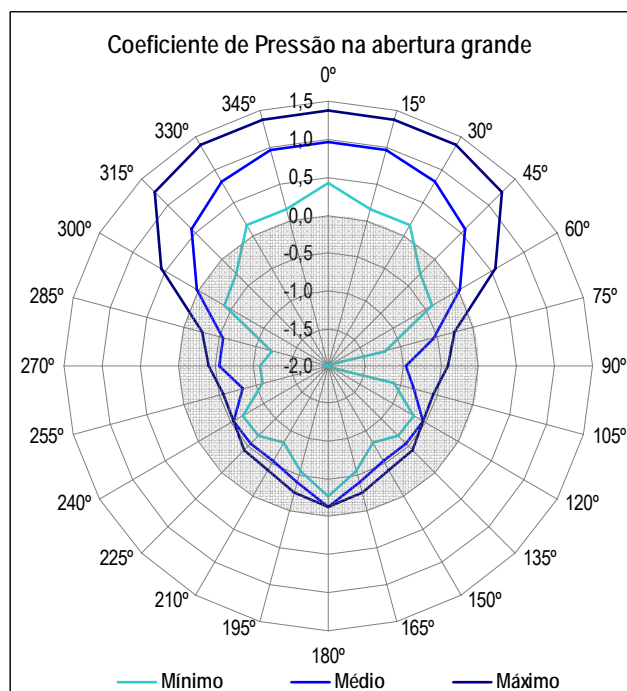



Figura 48 – Gráfico da variação dos coeficientes de pressão na abertura grande.

Este recurso pode ser utilizado tanto durante a fase de projeto, quanto para edificações já construídas, basta alinhar a direção do 0º do gráfico com a normal da abertura, conforme ilustrado na Figura 49. Logo, é possível estimar o CP de acordo com o ângulo de incidência do vento.

Figura 49 – Exemplo de utilização do recurso gráfico proposto.

Sabendo-se que o vento é induzido pela diferença de pressão entre pontos que possuem uma ligação física entre si, fica claro a importância de se determinar a diferença entre os coeficiente de pressão nas aberturas de entrada e saída do ar. Nos modelos simulados, as aberturas estão dispostas em faces opostas, portanto basta analisar a diferença dos coeficiente de pressão – ΔCp para o ângulo de incidência entre 0º e 90º. De acordo com os resultados da simulação o ΔCp é de aproximadamente 1,2 nos primeiros 30º a partir de onde passa a cair

rapidamente, estabilizando em torno de 0,4 a partir dos 75º. Comparando estes resultados com o método de estimativa proposto por Lamberts et.al. (2000), conforme descrito na Tabela 4, percebe-se forte aproximação entre os valores, o que reforça a eficácia do método algébrico para casos simplificados (Figura 50).

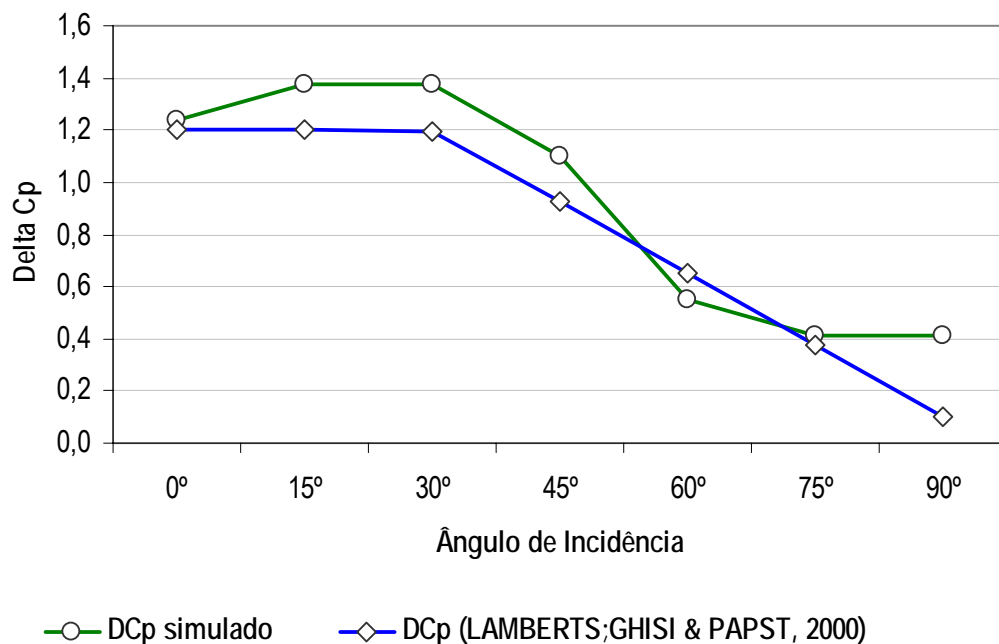



Figura 50 – Gráfico da comparação entre o coeficiente de pressão simulado e estimado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prática projetual tende a subestimar o potencial da ventilação natural, desconsiderando os benefícios que o resfriamento passivo pode trazer para o espaço habitado. A implantação e a forma do edifício alteram o regime de vento local ao criar diferentes zonas de pressão em torno da edificação. As especificidades do escoamento do ar e as variáveis climáticas dificultam a predição da ventilação natural com baixo grau de incerteza, mesmo em projetos de pequena escala (CHEN, 2004). A ventilação, quando contemplada na elaboração do projeto, é geralmente representada por vetores que sugerem o percurso do vento no interior e no entorno da edificação. Esta predição segue a intuição do projetista e possui reduzido grau de confiabilidade, visto que a correta estimativa do fluxo de ar exige conhecimento aprofundado sobre o fenômeno físico.

Apesar da complexidade, o uso da ventilação natural em projetos desenvolvidos para o clima quente e úmido torna-se imprescindível frente aos benefícios obtidos. A utilização de recomendações bem embasadas para potencializar a eficiência da ventilação natural no decorrer do processo projetual, auxiliadas por ferramentas adequadas, aumentam significativamente a probabilidade de tomar decisões acertadas

Há recomendações simples e acessíveis deste a fase de esboço que devem ser utilizadas na falta de uma ferramenta ou de métodos mais elaborados. Constatou-se que os métodos algébricos permitem estimar, com razoável precisão, a taxa de renovação e a velocidade interna a partir dos dados climáticos e das dimensões dos ambientes e das aberturas. A elaboração de uma planilha eletrônica agiliza a comparação de múltiplas alternativas de orientação e de tamanho das aberturas, fornecendo argumentos quantitativos às decisões tomadas. As planilhas permitem a imediata quantificação do impacto de cada variável, mesmo que de maneira estimada, sem a necessidade de modelagem ou reconfiguração do *software*.

A planilha desenvolvida durante a pesquisa baseia-se nas equações simplificadas de cálculo da taxa de renovação e de velocidade interna, apresentadas no referencial teórico e corroboradas pelo resultado das simulações (Figura 51). Foram utilizados oss dados de direção e velocidade do vento dos arquivos climáticos de referência, obtidos na biblioteca virtual do Labee/ UFSC (LABEEE, 2005), em função destes estarem completos e de fácil aquisição. Contudo, uma vez obtendo dados de ventilação completos e recentes de alguma cidade contemplada pela planilha, basta fazer a substituição do banco de dados. O objetivo foi oferecer uma ferramenta que fosse: acessível aos projetistas, compatível com as primeiras fases de projeto, aplicável as demais etapas e que proporcionasse saídas gráficas compreensíveis. Apesar das limitações e da margem de erro pertinente ao método, considera-se como principal benefício a possibilidade da rápida comparação de múltiplas alternativas, alterando-se somente as variáveis numéricas.

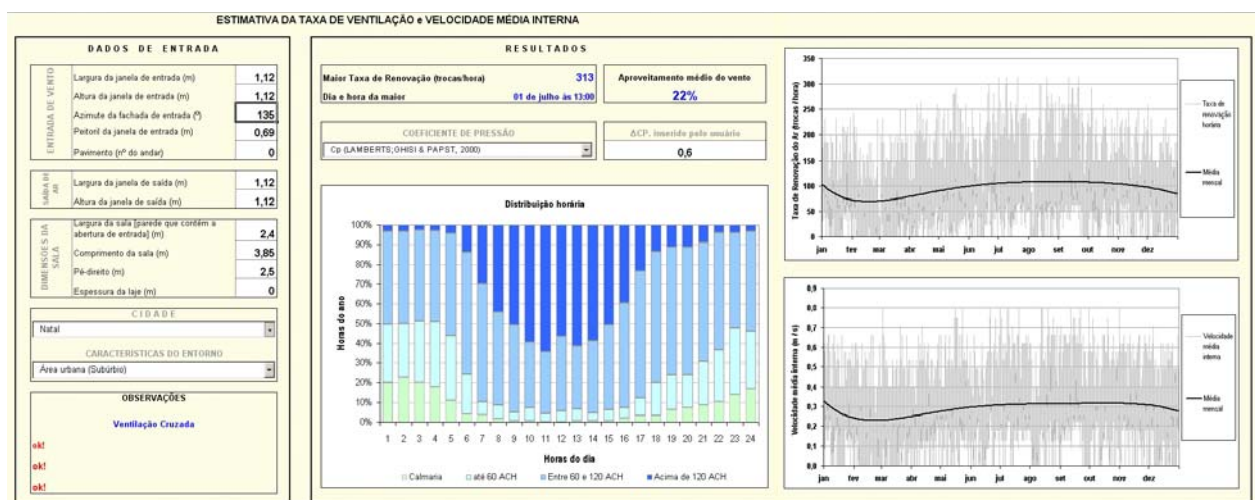



Figura 51 – Planilha para estimativa da taxa de renovação e da velocidade média interna.

O tratamento dos dados de saída buscou favorecer a assimilação dos resultados e a compreensão do comportamento da ventilação ao longo do ano. Neste sentido, foram desenvolvidos três gráficos para caracterizar o potencial de uso da ventilação natural no ambiente interno. Dois gráficos mostram a distribuição da taxa de renovação e da velocidade interna ao longo do ano, respectivamente. O terceiro gráfico procura mostrar como a taxa de renovação varia ao longo do dia, revelando as horas nas quais a ventilação costuma ser mais intensa e quando há maior ocorrência de calmaria.

A planilha vem sendo apresentada aos integrantes do Grupo de Pesquisa Conforto Ambiental e Eficiência Energética/ UFRN -CNPq, aos alunos de graduação durante as disciplinas de conforto e no desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso e também aos profissionais que procuram o LabCon/ UFRN. Esta divulgação tem mostrado que há uma resistência inicial em tratar das variáveis do projeto apenas por meio de valores numéricos. Porém, esta resistência é facilmente contornada após a explicação dos benéficos e da rapidez em obter resultados que contemplam todo o ano, além da possibilidade de avaliações paramétricas.

5.1 Quanto à simulação computacional

A operação de *softwares* de CFD ainda envolve elevado nível de complexidade. Apesar da interface amigável; o aprendizado, a operação e a seleção das variáveis envolvidas no escoamento exigem conhecimentos aprofundados do fenômeno físico, pouco compatíveis com a prática projetual e a formação do arquiteto.

A simulação simultânea da ventilação externa e interna mostrou-se de difícil convergência. A realização deste tipo de simulação exigiria muito tempo dedicado ao aprendizado do *software*, o que implicaria na redução do tempo para a análise dos resultados e, em último caso, inviabilizaria o desenvolvimento da pesquisa dentro do prazo disponível. Assim, baseado em estudos precedentes descritos na bibliografia pesquisada, optou-se por realizar apenas a simulação externa.

Os obstáculos operacionais inviabilizaram a simulação da ventilação interna, ficando como sugestão para trabalhos futuros. As simulações da ventilação externa consideraram o modelo com as aberturas fechadas, o que representa maior resistência ao escoamento e interfere na velocidade e na direção do vento nas imediações da fachada que comporta a abertura. A utilização destes dados na predição da ventilação interna, na qual as aberturas são livres à passagem do ar, certamente apresenta alguma diferença com o fenômeno real.

A simplificação do modelo não foi suficiente para que as simulações convergissem de imediato. Praticamente em todos os casos foi necessário simular o mesmo modelo com diferentes configurações de malha e parâmetros de relaxação até atingir a convergência necessária. A configuração de malha sugerida pelo *software* demonstrou ser espaçada demais, implicando na convergência acima do desejado. Cada modelo exigiu uma configuração de malha específica, sendo mais refinada para os casos de incidência oblíqua. A especificação da malha mais adequada a cada modelo partiu da configuração sugerida pelo *software*, a qual era refinada gradativamente de acordo com o resultado dos gráficos dinâmicos gerados em cada simulação.

Ciclos periódicos caracterizavam a instabilidade e indicavam um refinamento insuficiente. Malhas demasiadamente refinadas tornavam o processamento muito lento, o que dificultava inclusive a identificação dos padrões de instabilidade ou a tendência de estabilização acima do nível desejado.

Após esgotar a possibilidade de refinamento de malha sem obter sucesso na convergência, partiu-se para a simulação em estágios, alterando-se o fator de relaxação. A simulação em estágios demonstrou ser eficaz para resolver problemas de instabilidade e convergência, porém implicou em maior número de simulações e mais tempo de processamento, visto que cada modelo passou a ser simulado diversas vezes até convergir satisfatoriamente.

O processo necessário para obtenção da convergência foi a maior dificuldade técnica na execução das simulações. O tutorial tende a supervalorizar as características positivas do *software* e trata a falta de convergência como algo raro de acontecer, o que não foi observado na prática. As técnicas para obtenção da convergência estão espalhadas no tutorial e são apresentadas junto à explicação dos comandos, dificultando a busca. Dentre os artigos e demais trabalhos pesquisados na revisão bibliografia, poucos mencionam o espaçamento da malha, o critério de convergência e as técnicas utilizadas para atingi-lo.

O tempo para realizar uma simulação e a facilidade de operação são fatores determinantes na utilização voluntária de um *software*, principalmente nas fases iniciais de projeto onde são várias as alternativas possíveis. As simulações normalmente são compostas de quatro etapas: modelagem, configuração, processo de cálculo e análise dos resultados. Os *softwares* de predição do sombreamento, tais como o *Suntool* (MARSH, 2001), apresentam grande interatividade entre as etapas, a ponto de tornar a sequência adotada imperceptível. Ou seja, é possível aferir em tempo real a sombra gerada por determinado elemento enquanto este é modelado. Aliado á interatividade, soma-se como fator positivo na aceitação de um *software*, a compreensão das variáveis envolvidas. Nestes dois aspectos a simulação da ventilação natural é incipiente. Os *softwares* de CFD são rígidos quanto às etapas: qualquer alteração no modelo implica em retornar

ao início do processo e a configuração envolve variáveis estranhas ao conhecimento do arquiteto, tais como: número de interações, coeficiente de relaxação, critério de convergência e modelos de turbulência.

Conclui-se, portanto, que ainda há aspectos de ordem prática a serem trabalhados e melhorados para que a simulação da ventilação natural seja introduzida no processo projetual com maior naturalidade. Os *softwares* disponíveis desestimulam a aproximação junto ao desenvolvimento do projeto, principalmente por trabalharem com variáveis incompreensíveis ao projetista. O custo da consultoria de CFD impossibilita sua realização no decorrer das etapas e costumam ocorrer apenas no final do processo, limitando-se a verificar o possível sucesso das decisões tomadas.

5.2 Quanto aos resultados

Os resultados apresentados neste trabalho são específicos do modelo adotado e aplicáveis para os casos similares. A consistência dos resultados ficará comprometida à medida que o projeto a ser elaborado ou analisado se distanciar do modelo simulado, pois cada edificação possui características morfológicas que influenciam no desempenho da ventilação natural. As simulações foram realizadas em regime permanente de escoamento e por isto representam apenas o instante em que o vento incide com aquela velocidade e orientação. Na prática, a ventilação é melhor caracterizada pelo regime transiente, por oscilar bruscamente em pequenos intervalos de tempo. Para uma representação mais fiel ao fenômeno real, seria necessário que o *software* aceitasse um arquivo contendo dados de velocidade e direção do vento, referente ao período a ser simulado, na configuração das condições de contorno.

O resultado das simulações mostrou que, para o modelo adotado, o ângulo de incidência é a variável mais importante na potencialização da ventilação natural. Há pouca variação na taxa de renovação para os primeiros 30º de incidência. O aumento da abertura de saída melhora a renovação do ar interno, todavia é possível estabelecer algumas considerações, tais como:

- Variações na abertura de saída repercutem com maior ênfase na área efetiva de ventilação, tendo em vista que estas não sofrem influência do ângulo de incidência (Equação 9);
- O aumento na abertura de saída surte mais efeito quando a abertura de entrada é grande e com ângulo de incidência até 30º. Para aberturas de entrada pequena e/ou para ângulos de incidência maiores do que 45º, o aumento na taxa de renovação torna-se menos expressivo;
- A melhoria na taxa de renovação do modelo com aberturas grandes de entrada e saída, em relação ao caso com aberturas pequenas, é em torno de 70%, qualquer que seja o ângulo de incidência.

A distribuição de velocidade no entorno da edificação confirmou o efeito de aceleração do vento próximo às arestas do modelo, descrito na literatura como efeito de quina. Em locais com elevada ocorrência de vento, o uso de janelas de canto pode tornar-se inadequado, em função da velocidade com que o vento adentrará o ambiente. Por outro lado, posicionar aberturas nas quinas da edificação pode ser vantajoso em locais com pouca oferta ou intensidade de vento.

A comparação dos resultados permite afirmar que o método algébrico apresenta elevado grau de similaridade com a simulação computacional. Isto mostrou ser bastante positivo, pois aumenta a confiabilidade no método algébrico para solucionar problemas compatíveis com as primeiras fases do processo projetual. Ensaios em túneis de vento ou medições em modelos reais tornaria possível a validação tanto do método algébrico quanto da metodologia adotada nas simulações computacionais para o uso em situações práticas. Mesmo sem a validação, fica claro que a orientação e o dimensionamento das aberturas são fatores determinantes para o sucesso no uso da ventilação natural.

5.2.1 Sugestão para trabalhos futuros

Apesar das limitações de *software* e das concessões impostas pela metodologia, acredita-se que a simulação computacional é um ferramenta que pode agregar qualidade ao projeto arquitetônico. Assim, trabalhos futuros poderiam investigar a interferência das demais variáveis de envoltória e de leiaute interno no desempenho da ventilação natural. Dentre os itens não contemplados neste trabalho e que podem ser contemplados em trabalhos subsequentes, visando potencializar o uso da ventilação, estão:

- A forma e a posição das aberturas;
- A locação das aberturas em fachadas adjacentes;
- O fracionamento das aberturas de entrada e/ou saída;
- A forma e as dimensões do ambiente;
- A interferência do adensamento urbano;
- A interferência dos demais cômodos da edificação.

A simulação em CFD ainda é realizada de maneira estática, ou seja, a configuração das condições de contorno exige a adoção de valores fixos para a velocidade, a direção e a temperatura do ar. Além disto, os estudos em CFD normalmente consideram o regime permanente do escoamento. Contudo, na prática tais condições variam constantemente e em um intervalo bastante curto de tempo, o que torna a representatividade das simulações questionáveis, ou pelo menos demasiadamente específicas.

A simulação de CFD e de desempenho termo-energético costuma ser realizadas separadas e através de *softwares* distintos. Alguns programas apontam para a realização de ambas numa mesma plataforma, como é o caso do *Designbuilder*, na versão 2.0 em diante. Contudo as simulações são realizadas em módulos distintos, sem integração entre si, permanecendo a simulação termo-energética horária e a de CFD estática. Esta simulação

dinâmica poderá inclusive ser incorporada pelos *softwares* de simulação do desempenho termo-energético, que costumam tratar a ventilação de maneira incipiente.

A possibilidade de simular a ventilação em regime transiente dependerá do avanço dos *softwares* e da capacidade de processamento dos recursos computacionais. Uma vez solucionadas tais aspectos técnicos, a alimentação dos *softwares* de CFD com uma base de dados capaz de caracterizar o padrão de vento de determinado sítio permitirá a simulação do desempenho da ventilação com maior fidelidade ao fenômeno real.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABNT. **NBR15220-3: Desempenho térmico de edificações** Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Allard, Francis. **Natural ventilation in buildings**: A design handbook. Londres: James & James, 2002.356 p.

______. **Ventilation in building: a design handbook**: Londres: James & James, 1998.356 p.

Amar, F. Ben, et al. **Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia**. Renewable Energy. 2311-2321, 2008.

ANSYS. **ANSYS CFX**, Release 11.0 Tutorial: ANSYS CFX, 2006a.

______. **The CFX approach to turbulence modeling**: Accurate and effective turbulent flow simulations, CFX Technical Brief, 2006b.

______. **Workbench™ 11.0 SP1**. Canonsburg, 2007.

Asfour, Omar S.;Gadi, Mohamed B. **Using CFD next term to investigate previous termventilationnext term characteristics of vaults as wind-inducing devices in buildings**. Applied Energy. 15, 2007.

ASHRAE. **ASHRAE handbook of fundamentals**: New York: ASHRAE, 2001.p.

Bittencourt, Leonardo;Cândido, Christhina. **Introdução à ventilação natural**: Maceió: EDUFAL, 2005.p.

Bittencourt, Leonardo S., et al. **A influência do tipo de fechamento dos peitoris ventilados na velocidade e distribuição da ventilação natural em salas de aula**. X Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Minas Gerais. In: Anais do X Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Minas Gerais: 2007. 9 p.

Bonneaud, Frédéric, et al. **Simulation of the wind in hot and humid climates cities**: evaluation of the natural ventilation potential of the housing in urban blocks. Building Simulation. 109 - 116, 2001.

Cham. **Phoenics PVR**. Londres, 2005.

Chen, Qingyan. **Ventilation performance prediction for buildings**: A method overview and recent applications. Building and Environment. 1-11, 2008.

Chen, Qingyan;Srebric, Jelena. **Application of CFD Tools for Indoor and Outdoor Environment Design**. International Journal on Architectural Science,. 14-29, 2000.

Chen, Qingyan Yan. **Using computational tools to factor wind into architectural environment design**. Energy and Buildings. 1197-1209, 2004.

Chiua, Y. H.;Etheridge, D.W. **External flow effects on the discharge coefficients of two types of ventilation opening**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 95, 225-252, 2006.

Costa, Ennio Cruz da. **Ventilação**: São Paulo: Edgard Blucher, 2005.p.

CRESESB. **Atlas do potencial eólico brasileiro**: Brasília: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2001.p.

______. **Energia eólica princípios e tecnologias**: Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2007.p.

DBS. **DesignBuilder v.2.0.2** Londres, DesignBuilder Software Ltd, 2009.

Drach, Patricia Regina Chaves. **Modelagem Computacional e Simulação Numérica em Arquitetura Visando Conforto em Ambientes Construídos:**Modelagem Computacional e Simulação Numérica em Arquitetura Visando Conforto em Ambientes Construídos. 2007. 318 p. (Tese de doutorado) - Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Laboratório Nacional de Computação Científica, Petrópolis, 2007.

EDSL. **Tas Ambiens** Version 9.0.9e. 2008a.

______. **Tas Building Simulator 9.09e**. Reino Unido, 2008b.

EST. **Energy efficient ventilation in dwellings –** a guide for specifiers: Londres: Energy save trust, 2006.p.

Evans, J. M. **Evaluating comfort with varying temperatures**: a graphic design tool. Energy and Buildings. 35, 1, 87-93, JAN, 2003.

Garde, François, et al. **Implementation and experimental survey of passive design specifications used in new low-cost housing under tropical climates**. Energy and Buildings. 353-367, 2004.

Givoni, Baruch. **Man, climate and architecture**: Architectural science series. Amsterdam: Elseveir Publishing Company Limited, 1969.p.

______. **Man, climate and architecture**: Architectural science series. London: Applied Science Publishers, 1998.xvi, 483 p p.

Goulart, S. V. G., et al. **Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**: Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.p.

Grosso, Mario. **CpCalc+ v. 3.001**. Torino, Dipartimento di Scienze e Tecniche per i Processi di Insediamento, 1995.

Holanda, Armando de. **Roteiro para construir no Nordeste**: Estudos Urbanológicos. Recife: UFPE, 1976.48 p.

Kleiven, Tommy. **Natural Ventilation in Buildings:**Architectural concepts, consequences and possibilities. 2003. 305 p. (Tese de doutorado) - Department of Architectural Design, History and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Noruega, 2003.

LABEEE. **Arquivos climáticos**. Florianópolis, 2005. Disponivel em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadaclim.html>. Acesso em:

Lamberts, Roberto, et al. **Desempenho térmico de edificações**: Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.p.

______. **Analysis Bio**. Florianópolis, Labeee, 2003.

LAVAT-INPE/CRN. **Planilhas da estação climatológica/solarimétrica**: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009.

Liddament, Martin. **Technologies & Sustainable Policies for a Radical Decrease of the Energy Consumption in Buildings**. 27th AIVC Conference. Lyon. In: Anais do 27th AIVC Conference Lyon: International Energy Agency, 2006. 16 p.

Liddament, Martin W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**: Grã-Bretanha: The Air Infiltration and Ventilitation Centre, 1986.p.

Lôbo, Denise Gonçalves Ferreira;Bittencourt, Leonardo Salazar. **A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos**. Ambiente Construído. 3, 57-67, 2003.

Marsh, Andrew. **SUNTOOL v1.10** - Window Shading and Overshadowing. Perth, 2001.

Morbitzer, Christoph, et al. **Integration of building simulation into the design process of an architecture practice**. Building Simulation. 697 - 704, 2001.

Natal. **Código de Obras e Edificações do Município de Natal.** Lei Complementar Nº 055, de 27 de janeiro de 2004. Diário Oficial do Município, Natal, RN, p. 34, 2004.

Nicol, F. **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics**. Energy and Buildings. 36, 7, 628-637, JUL, 2004.

Ochocinski, Blazej. **Numerical Simulation of Air Flows** - an Essential Tool of Comfort Optimization of Modern Buildings and HVAC Systems. Building Simulation. 1 - 8, 1997.

Olgyay, Victor. **Design with climate : bioclimatic approach to architectural regionalism**: Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1963.190p p.

Oliveira, Alexandre Gomes de. **Proposta de método para avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente-úmido**. 2006. 172 p. (Dissertação de mestrado) - PPGAU, UFRN, Natal, 2006.

Pedrini, Aldomar;Szokolay, Steven. **Recomendações para o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte às primeiras decisões projetuais visando ao desempenho energético de edificações de escritório em clima quente**. Ambiente Construído. 5, 39-54, 2005.

Rosa, Jarbas André da. **Determinação dos campos de velocidade e temperatura em ambientes ventilados:**Determinação dos campos de velocidade e temperatura em ambientes ventilados. 2001. 106 p. (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Tan, Gang. **Study of Natural Ventilation Design by Integrating the Multizone Model with CFD Simulation**. 2005. 77 p. (Tese de Doutorado) - Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2005.

Toledo, Estáquio. **Ventilação natural das habitações**: Maceió: EDUFAL, 1999.170 p.

Trindade, Sileno Cirne. **Ventilação natural em edifícios tipo galpão no clima de Natal/RN: aplicação de simulação computacional:**Ventilação natural em edifícios tipo galpão no clima de Natal/RN: aplicação de simulação computacional. 2006. 125 p. - PPGAU, UFRN, Natal, 2006.

Wang, Liping;Wong, Nyuk Hien. **Coupled simulations for naturally ventilated residential buildings**. Automation in Construction. 17, 4, 386-398, 2008.

Wonga, P.C., et al. **A new type of double-skin façade configuration for the hot and humid climate**. Energy and Buildings. 1-5, 2008.

Anexo 1

Resultado da velocidade externa representados por linhas de percurso posicionadas à meia altura da abertura.

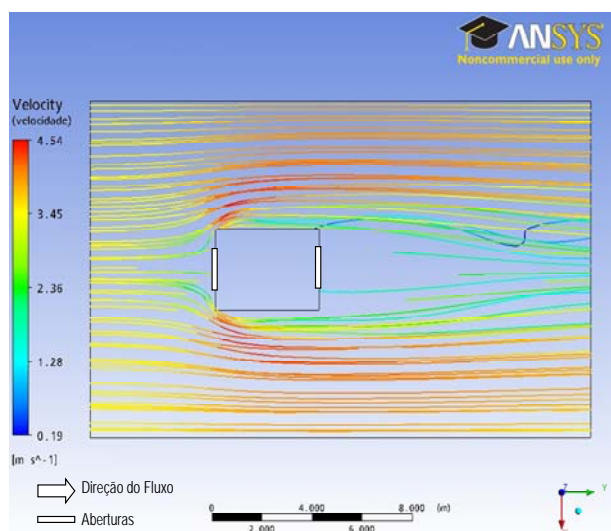



Figura 1 – Ventilação externa incidindo à 0º.

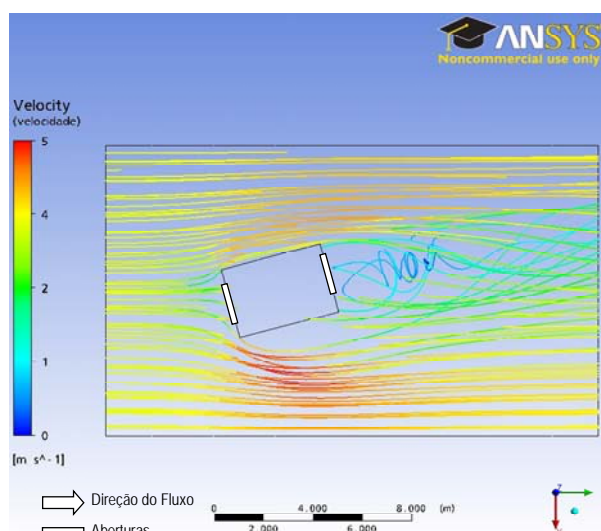



Figura 2 – Ventilação externa incidindo à 15º.

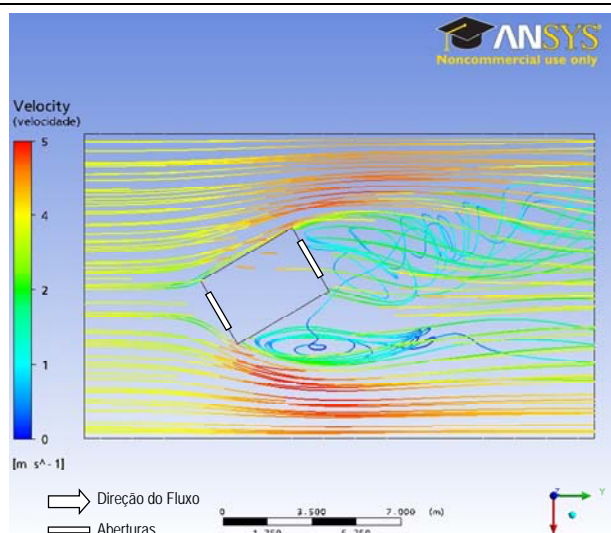



Figura 3 – Ventilação externa incidindo à 30º.

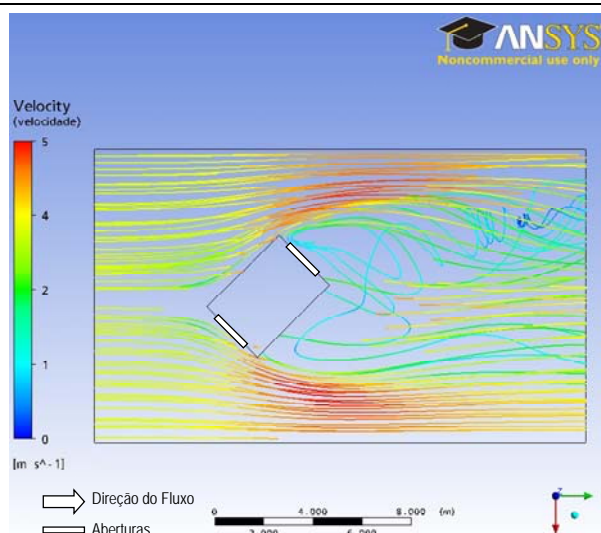



Figura 4 – Ventilação externa incidindo à 45º.

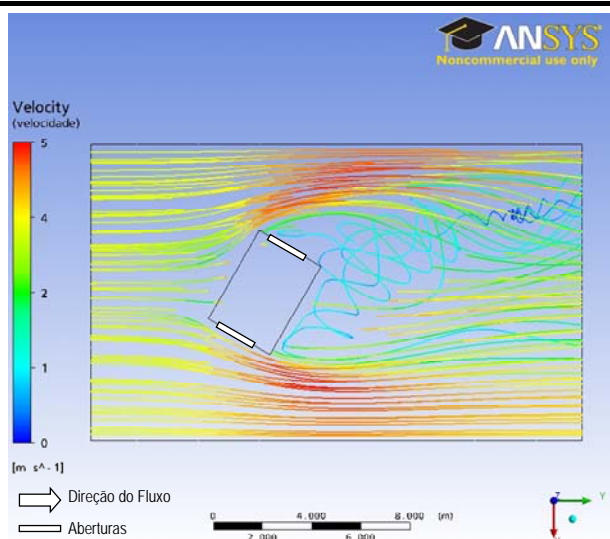



Figura 5 – Ventilação externa incidindo à 60º **Figura 6 – Ventilação externa incidindo à 75º**

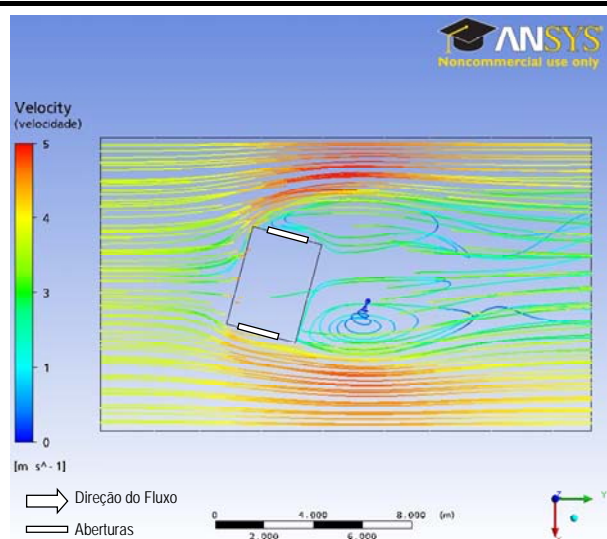
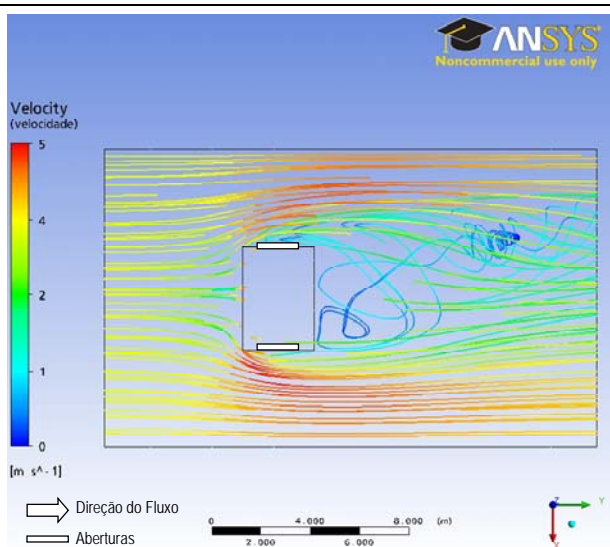



Figura 7 – Ventilação externa incidindo à 90º

Anexo 2

Resultado dos campos de pressão à meia altura da abertura e em sessão longitudinal.

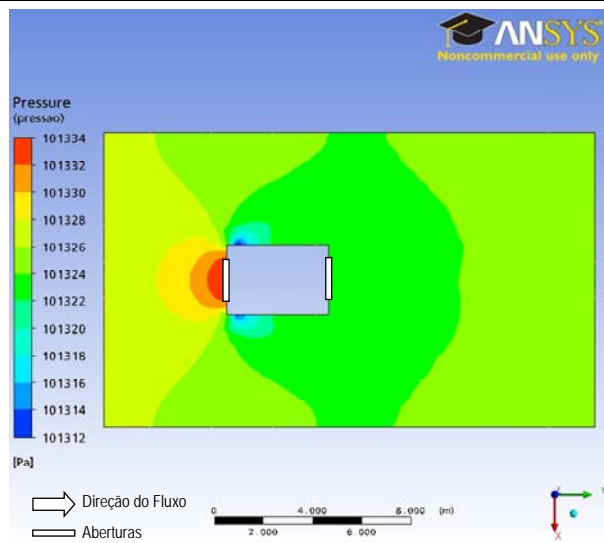



Figura 8 – Pressão externa em planta à 0º. **Figura 9 – Pressão externa em corte à 0º**

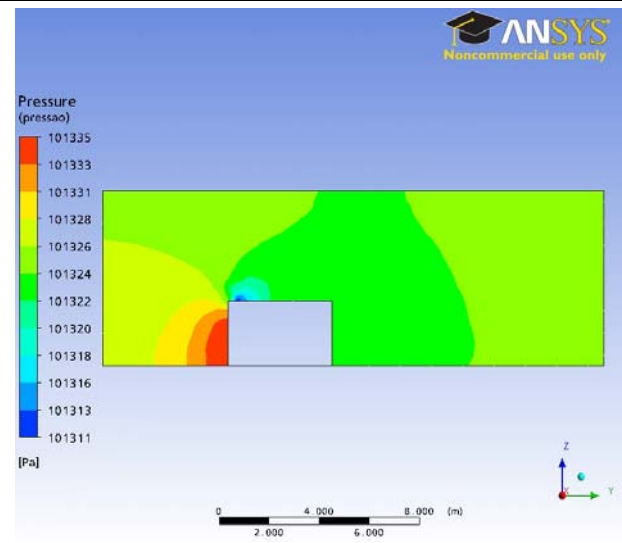
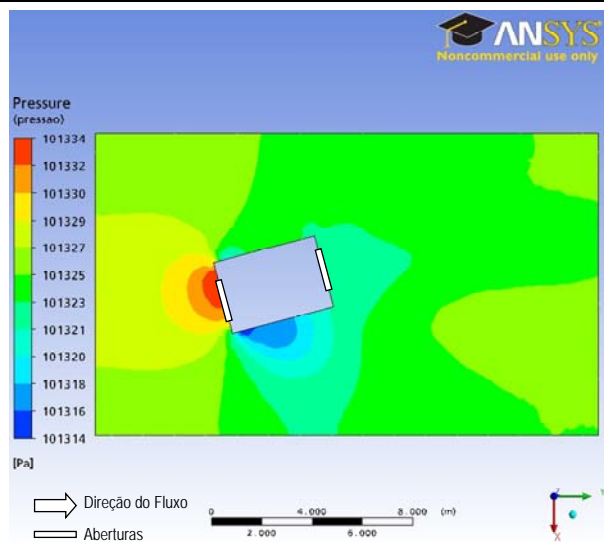



Figura 10 – Pressão externa em planta à 15º. **Figura 11 – Pressão externa em corte à 15º**

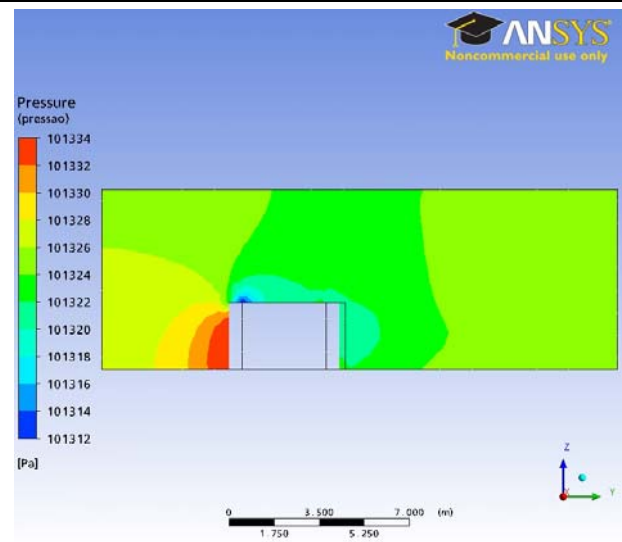
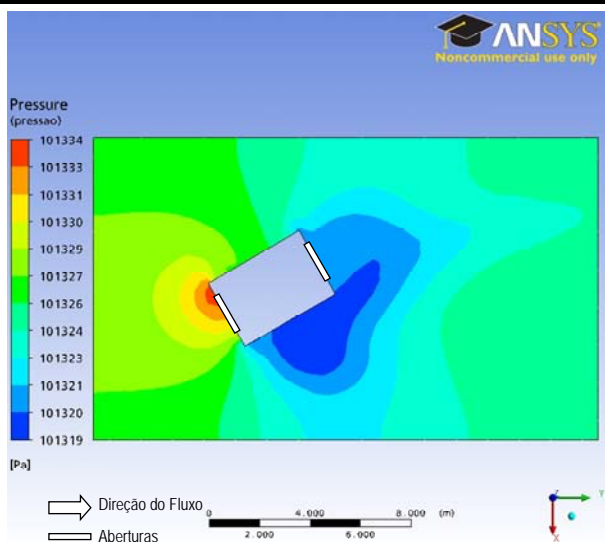



Figura 12 – Pressão externa em planta à 30º. **Figura 13 – Pressão externa em corte à 30º**

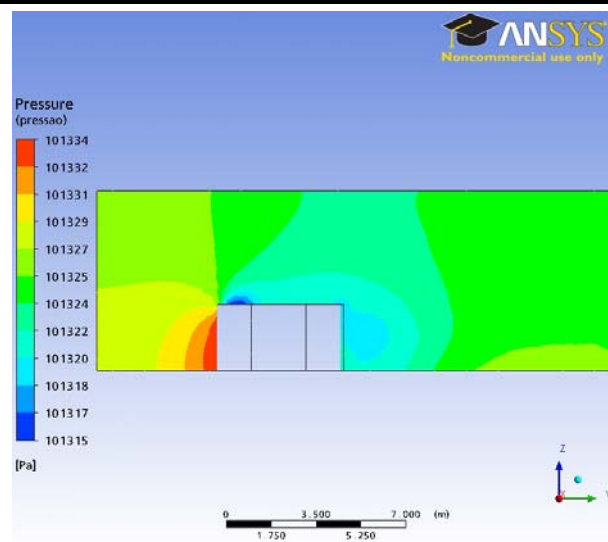
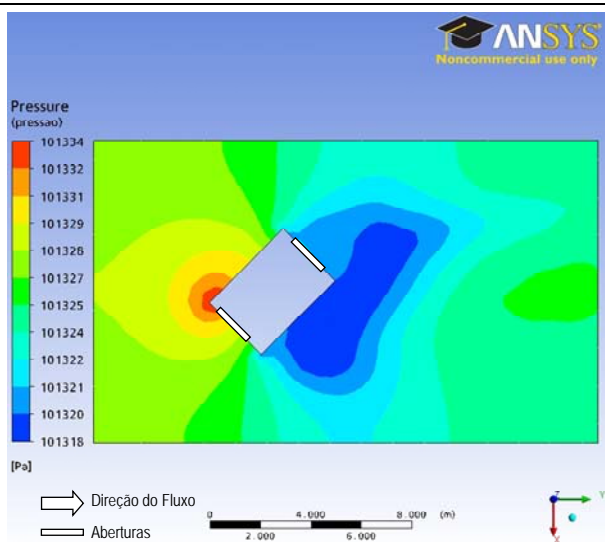



Figura 14 – Pressão externa em planta à 45º. **Figura 15 – Pressão externa em corte à 45º**

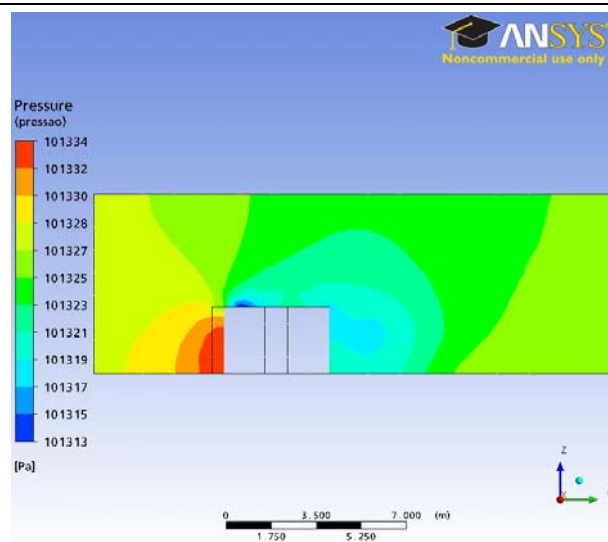
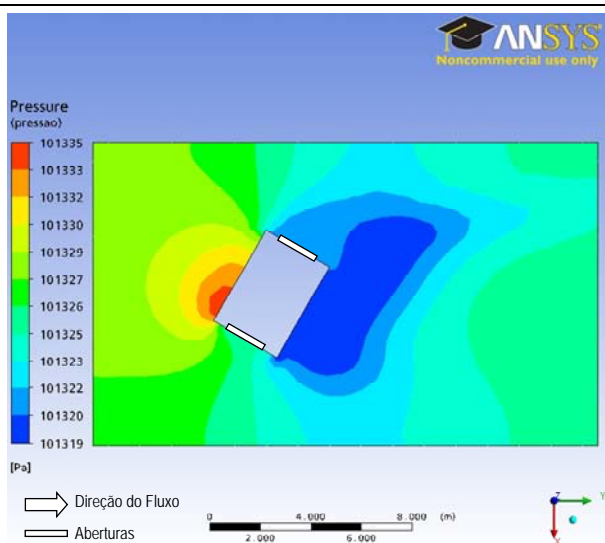



Figura 16 – Pressão externa em planta à 60º. **Figura 17 – Pressão externa em corte à 60º**

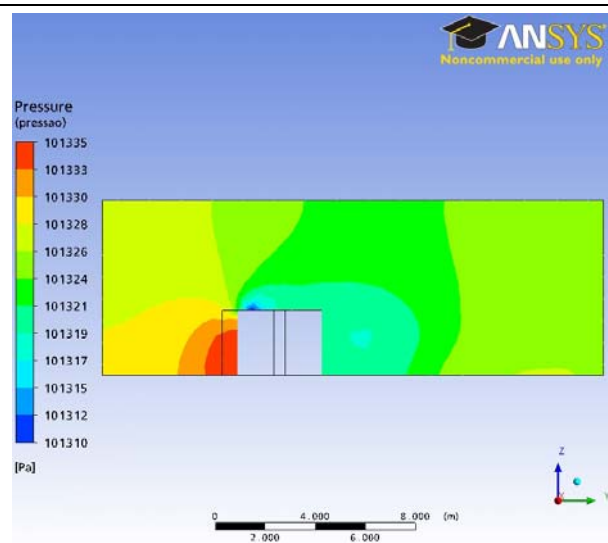
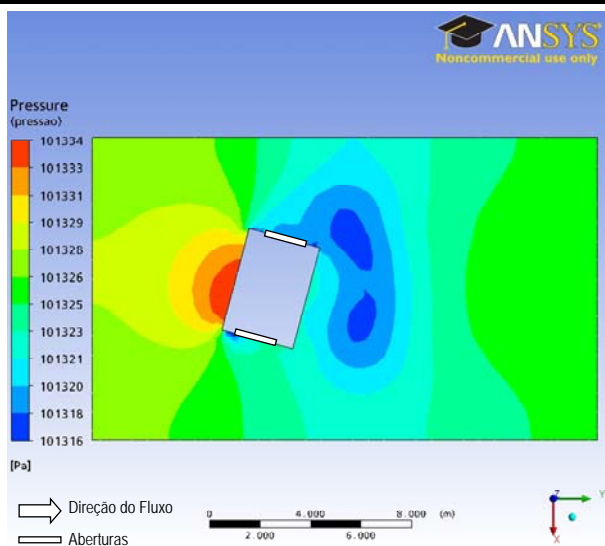



Figura 18 – Pressão externa em planta à 75º.

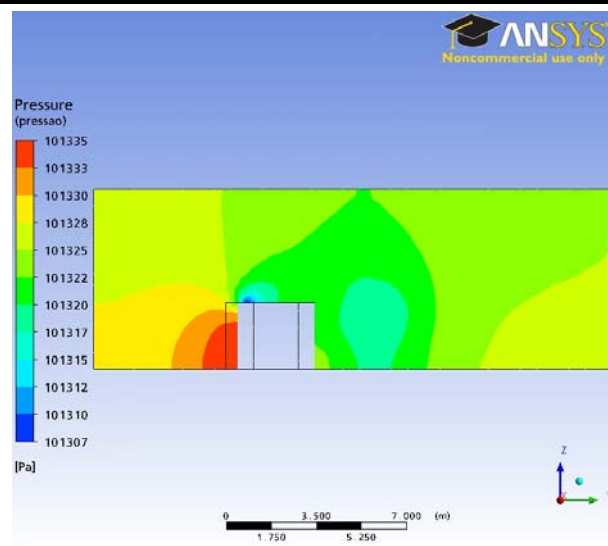



Figura 19 – Pressão externa em corte à 75º

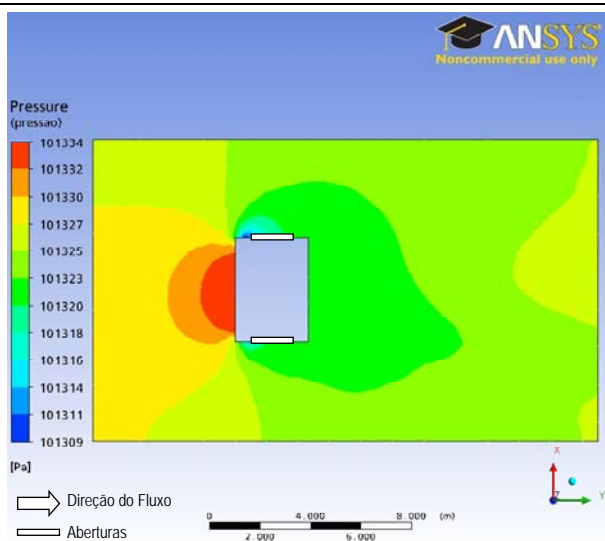



Figura 20 – Pressão externa em planta à 90º.

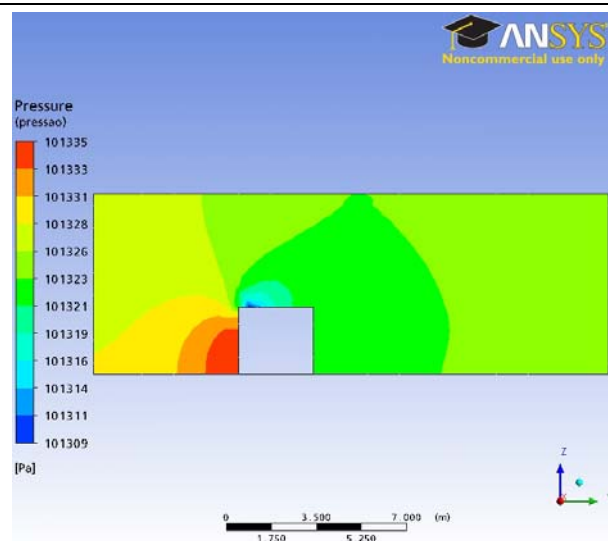
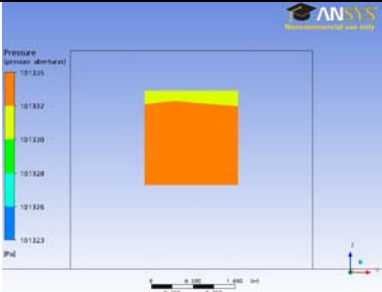
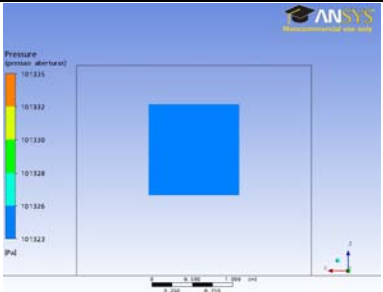
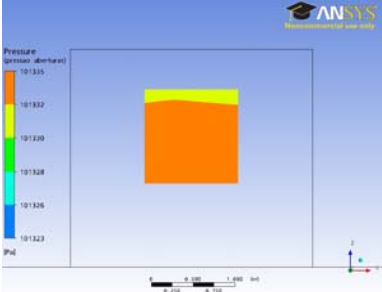
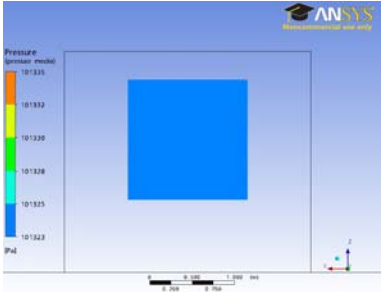
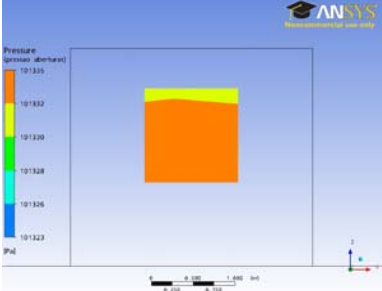
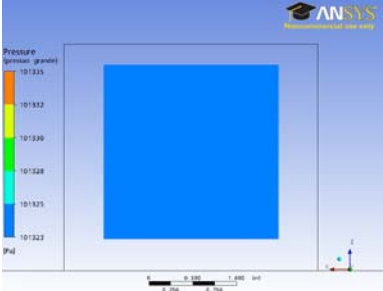
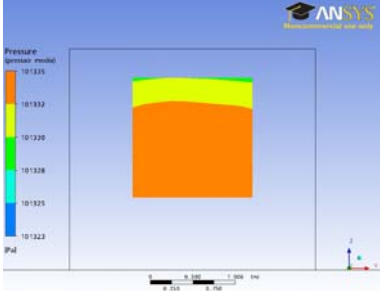
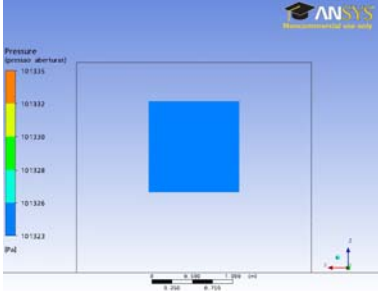
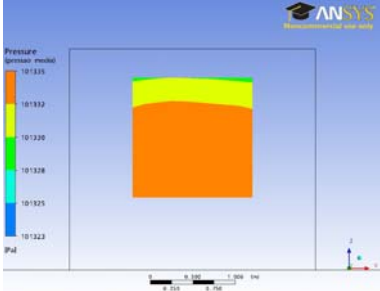
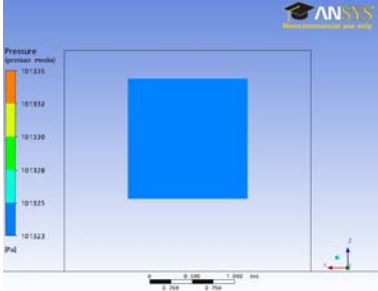
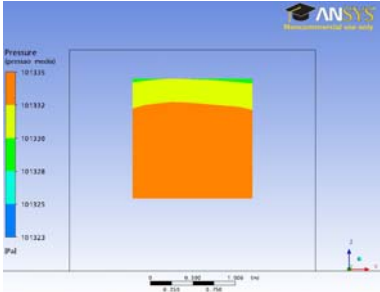
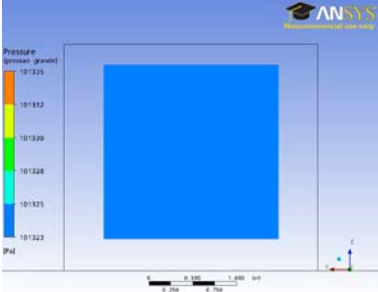
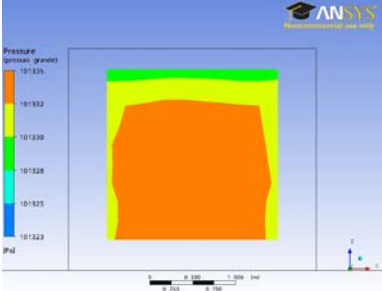
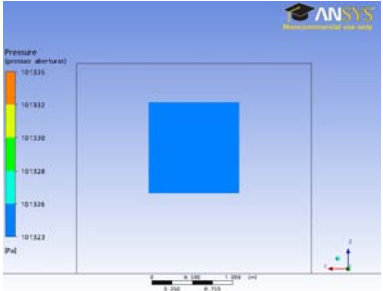
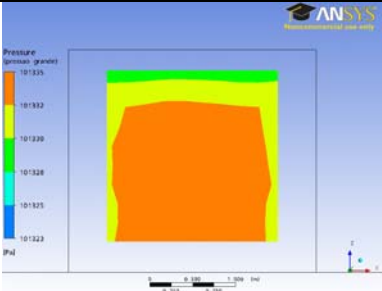
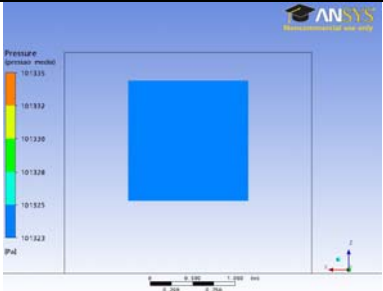
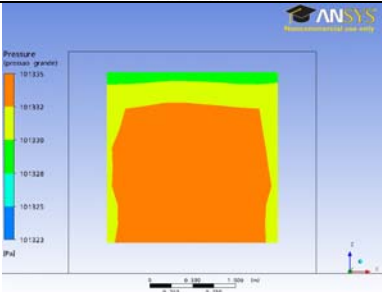
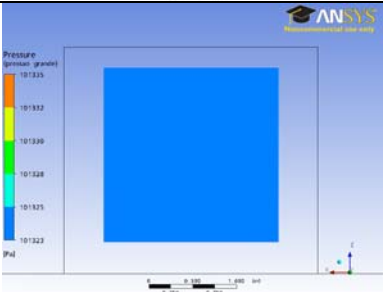
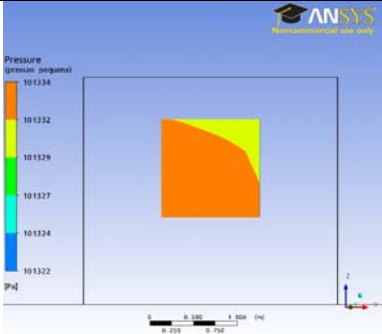
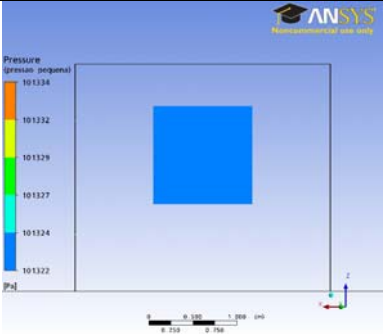
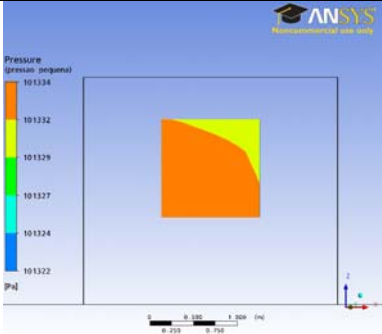
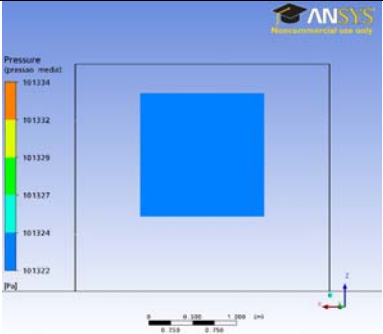
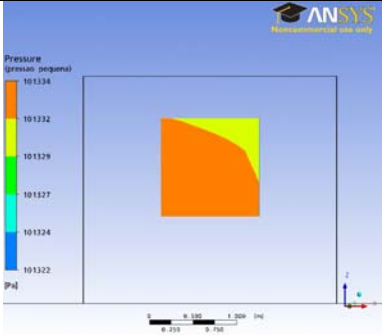
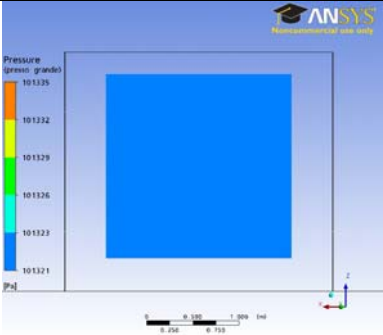
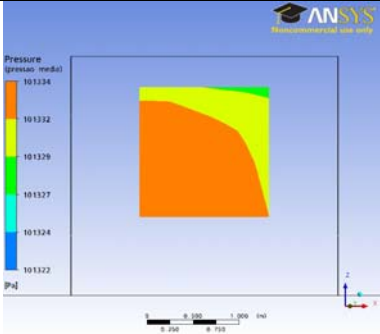
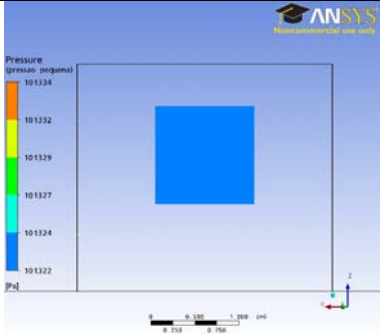
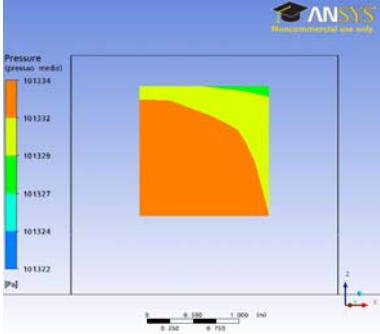
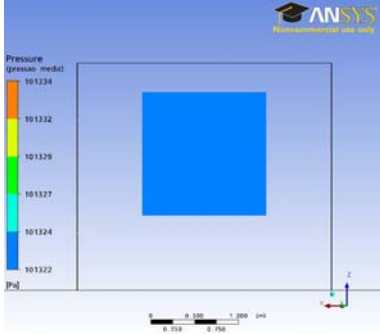
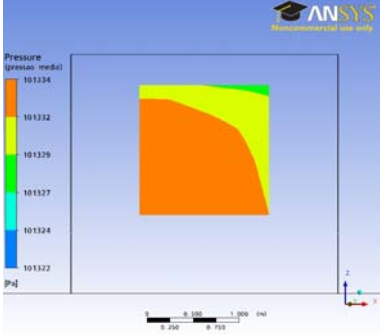
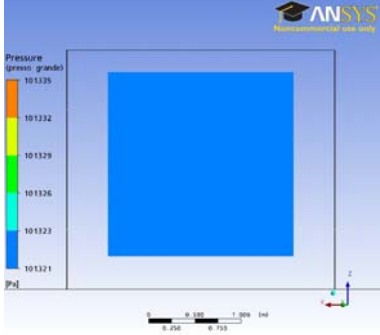
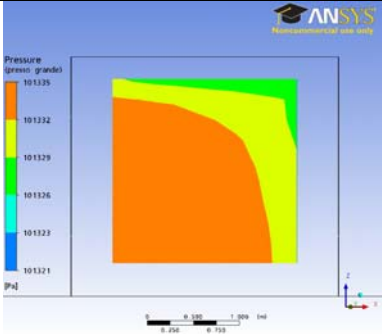
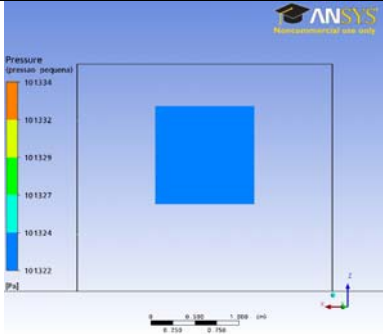
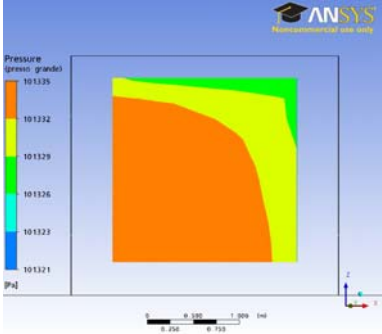
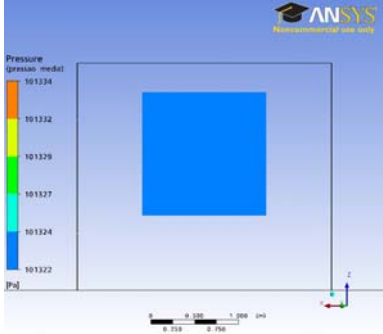
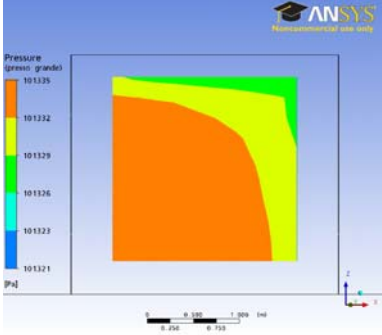
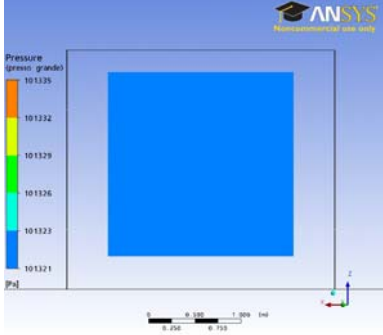
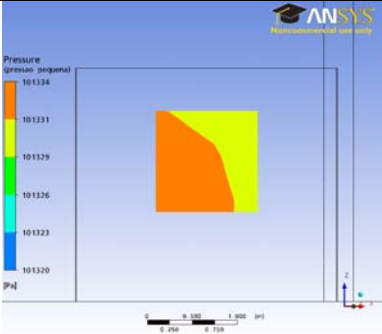
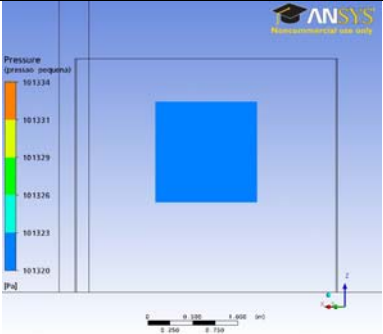
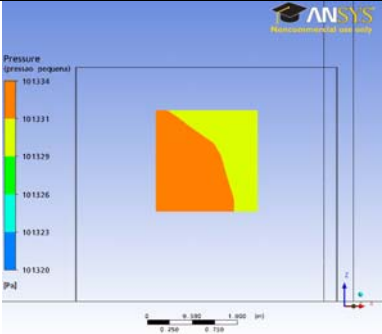
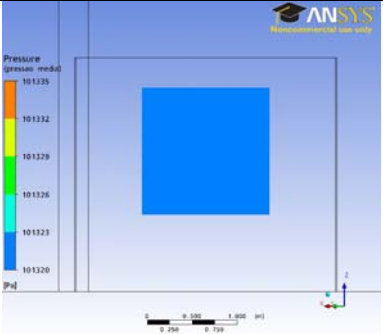
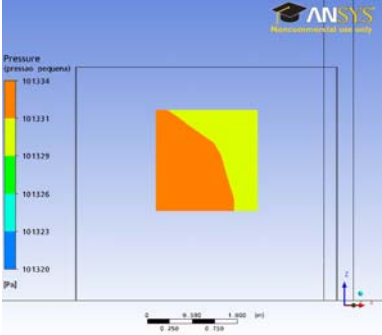
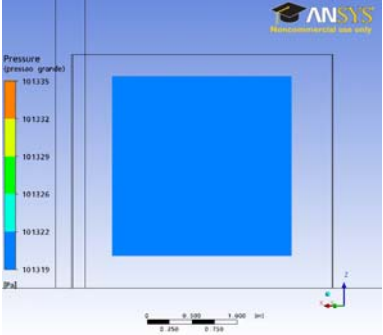
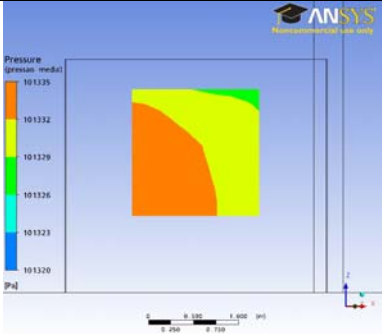
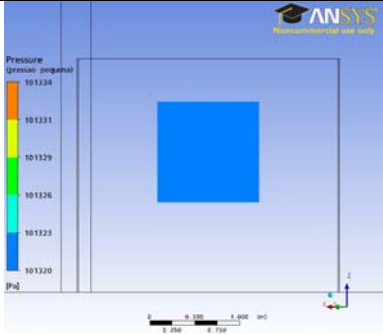
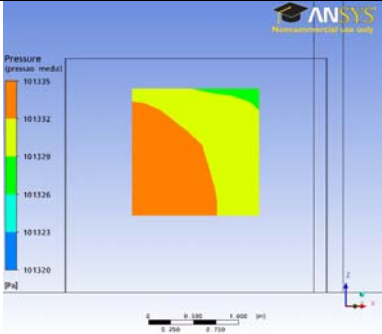
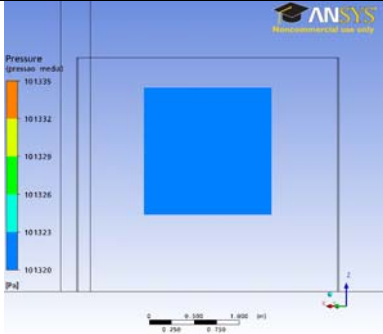
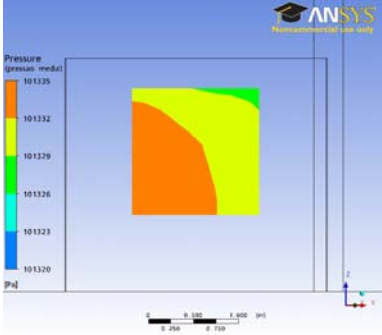
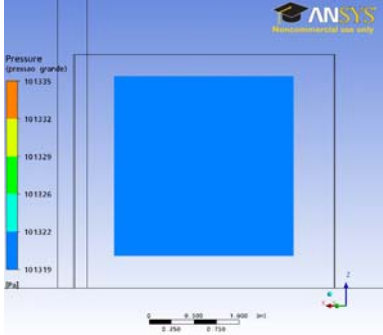
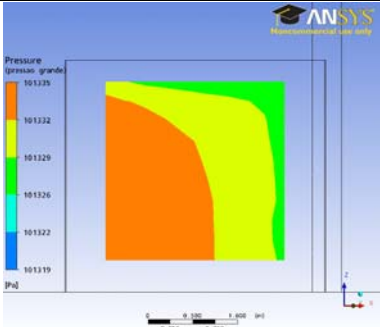
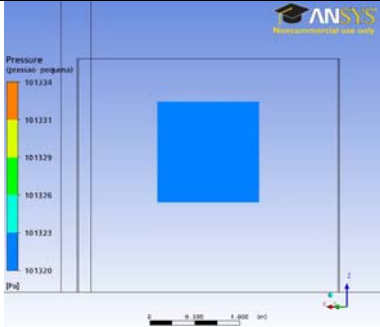
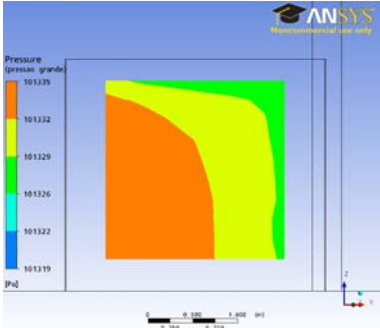
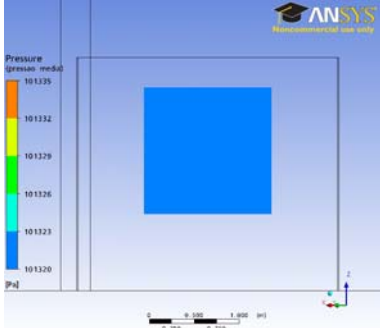
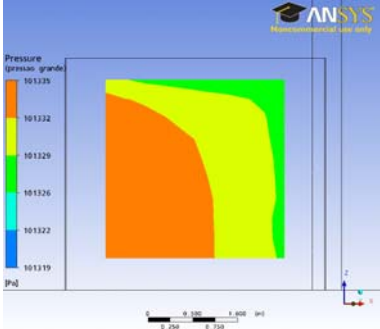
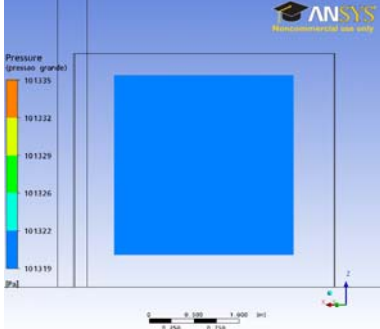
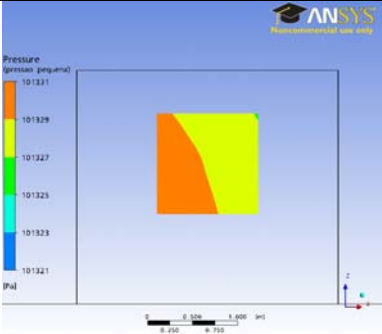
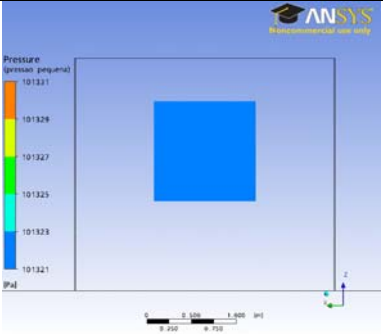
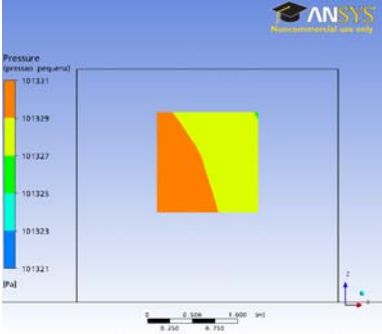
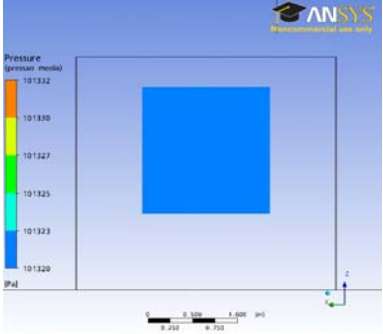
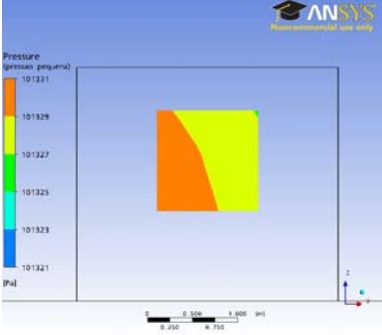
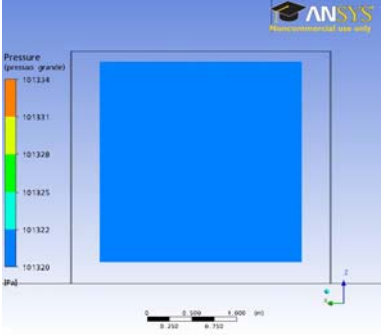
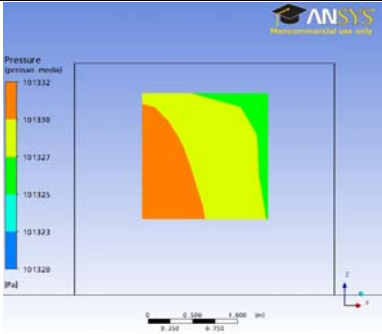
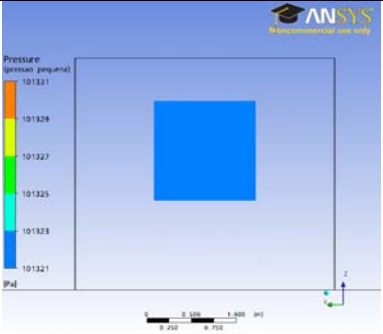
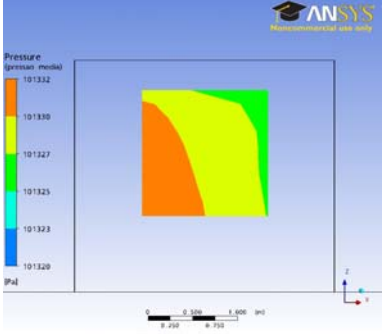
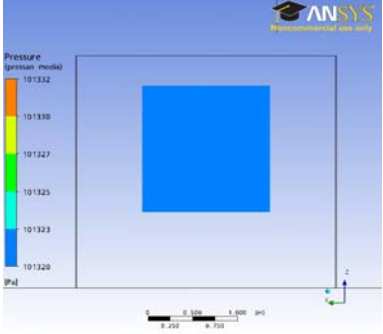
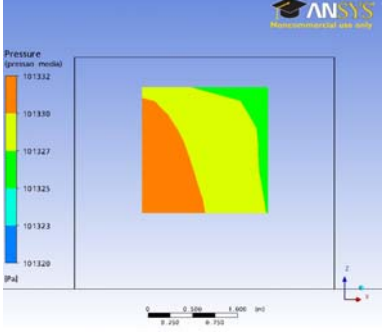
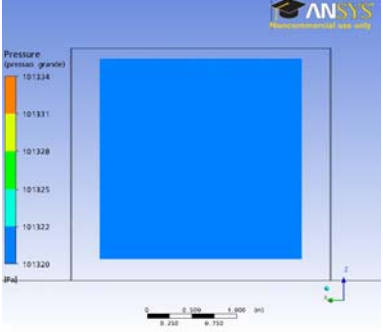
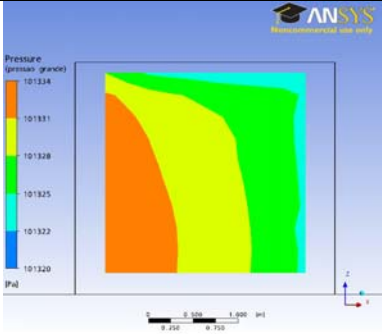
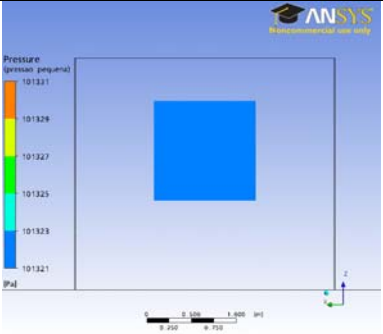
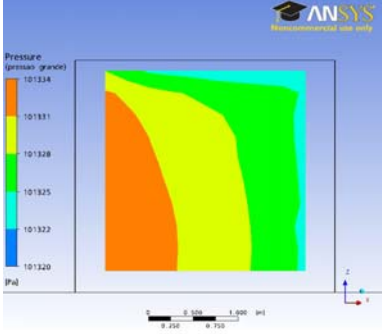
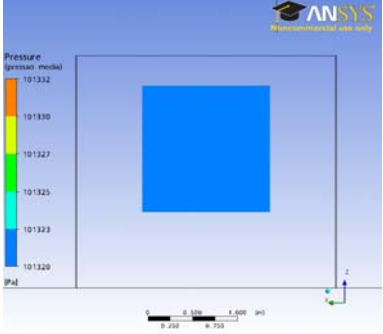
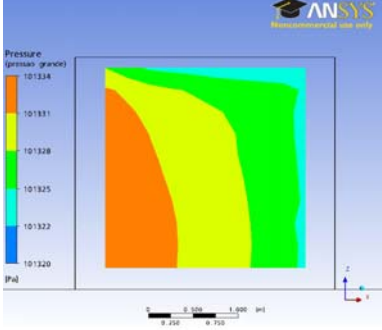
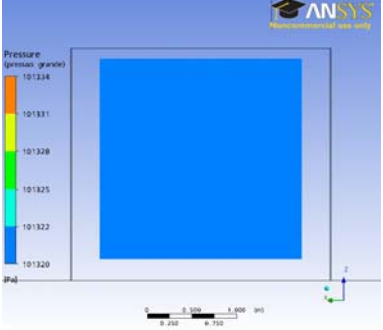
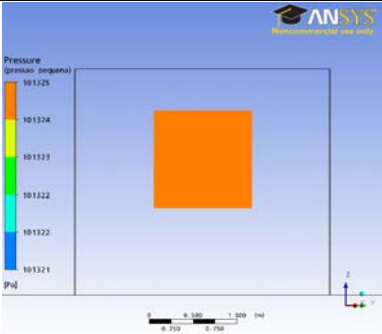
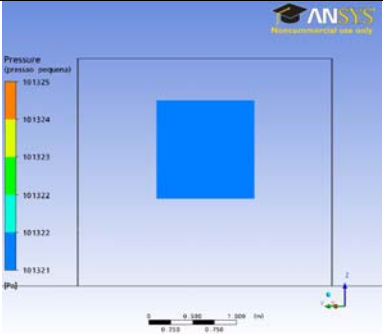
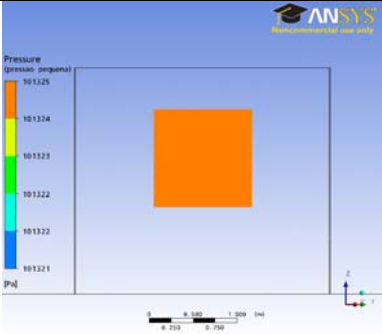
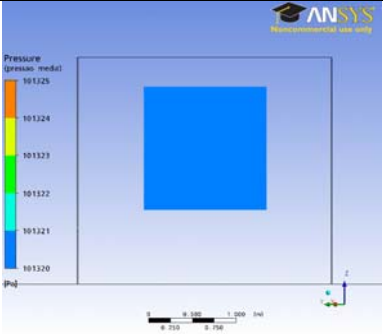
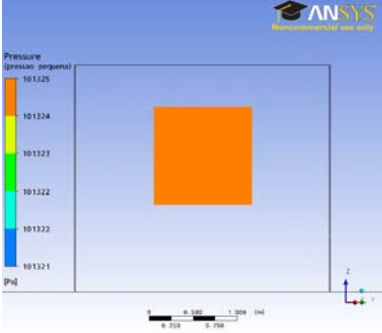
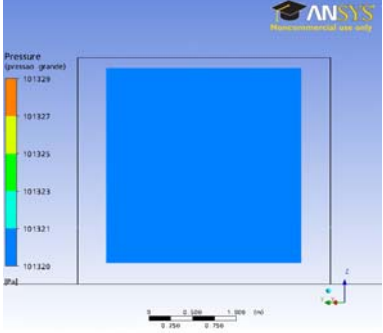
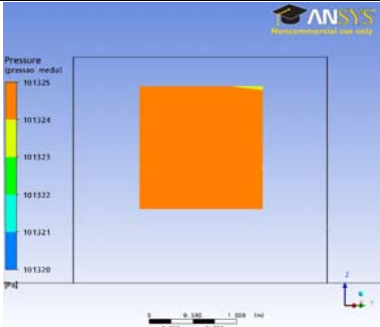
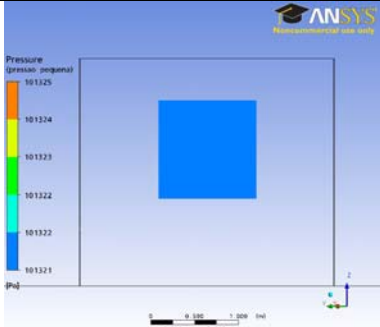
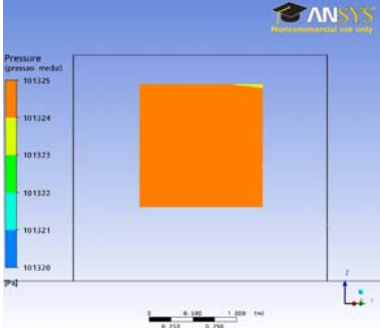
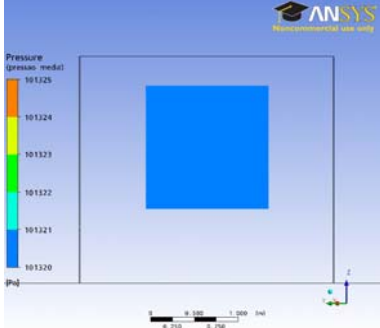
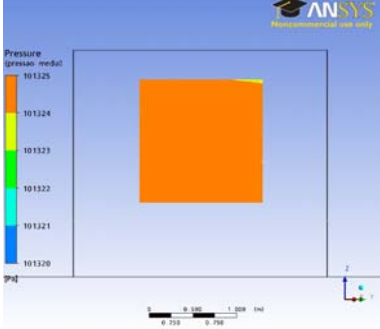
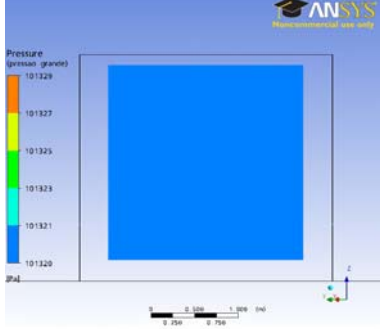
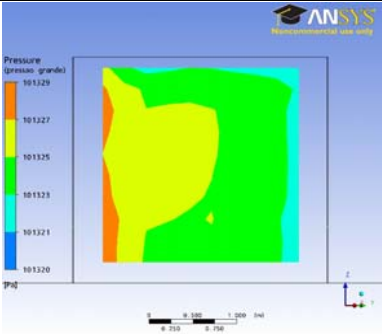
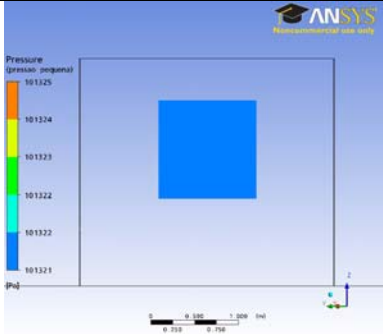
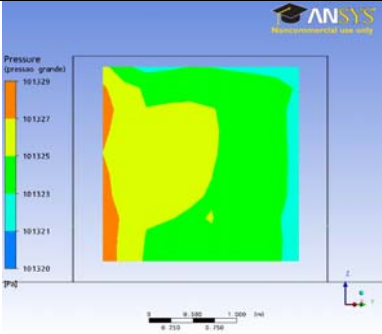
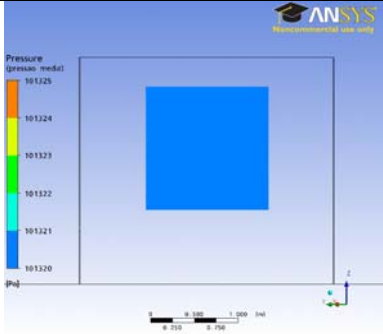
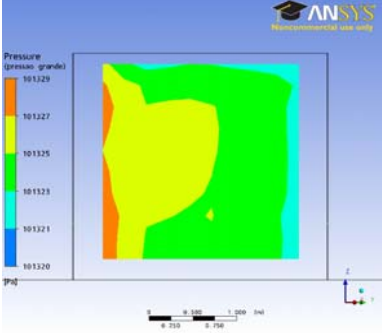
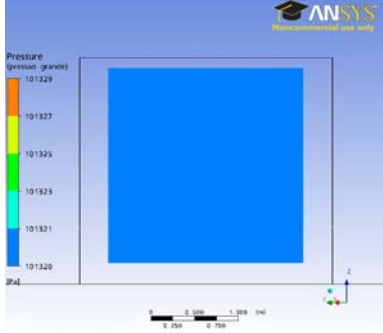
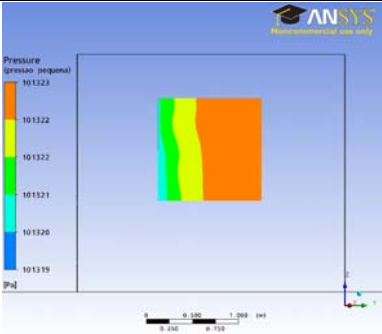
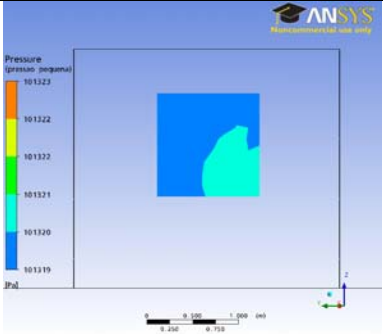
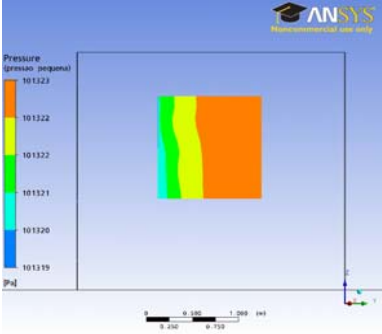
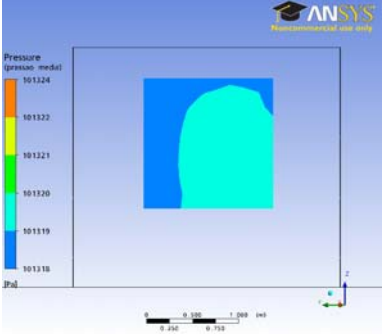
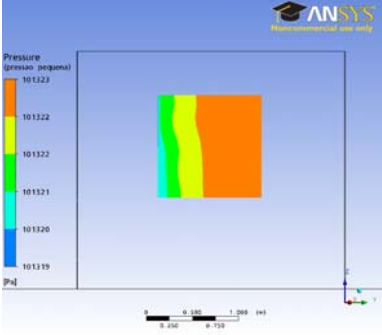
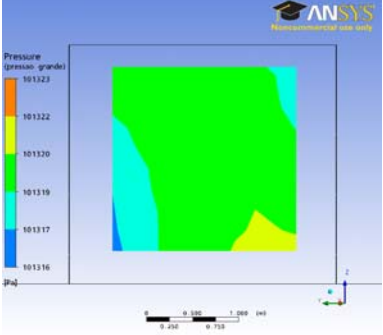
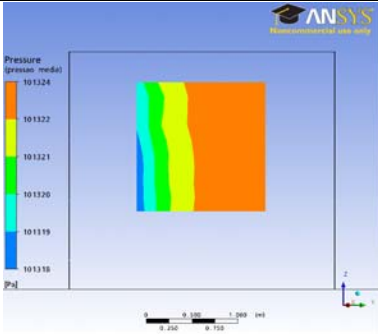
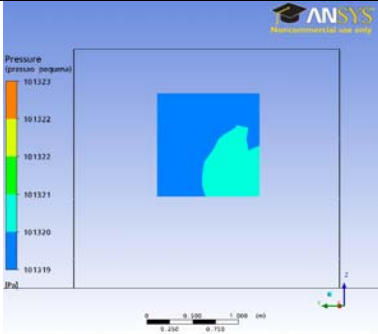
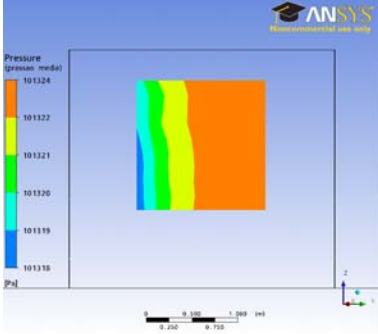
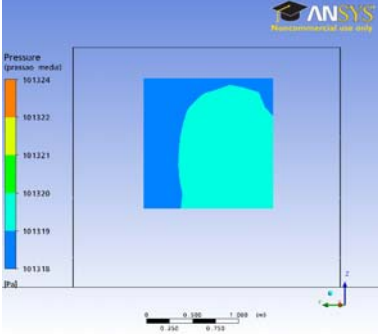
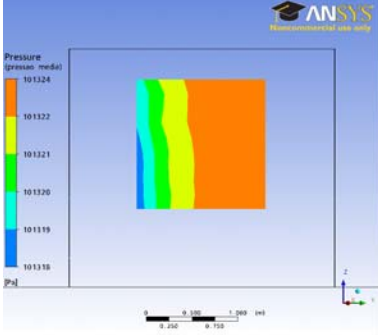
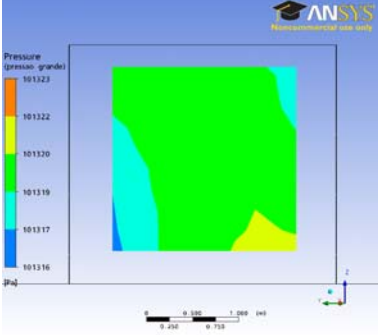
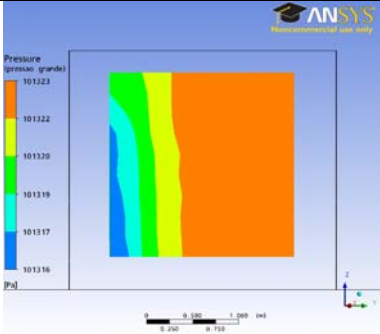
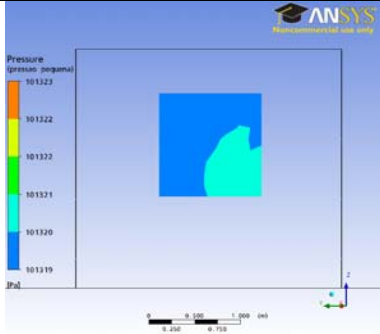
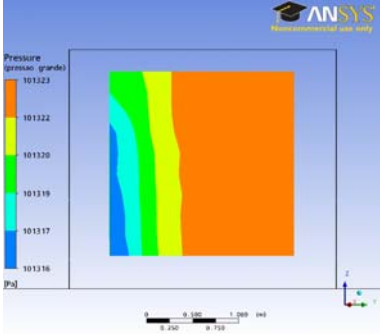
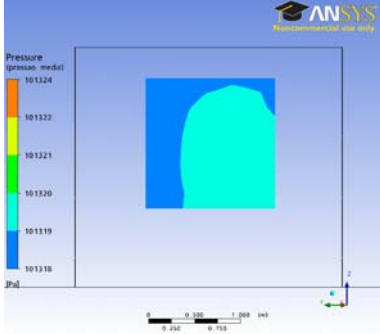
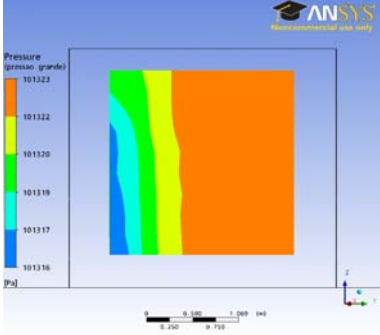
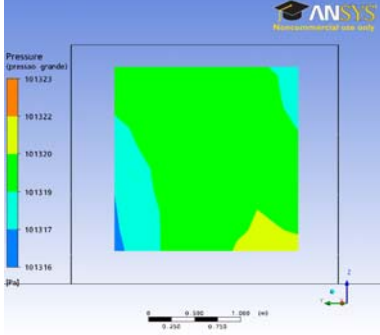
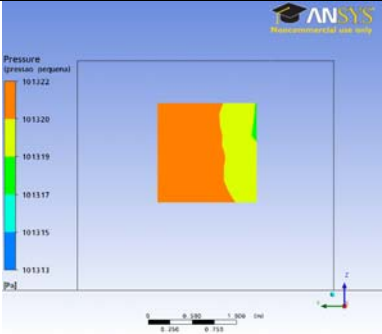
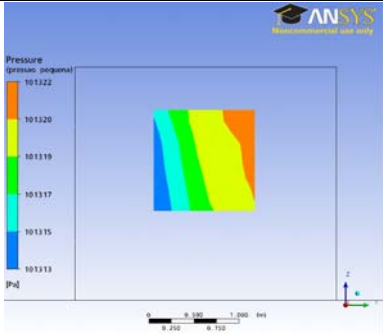
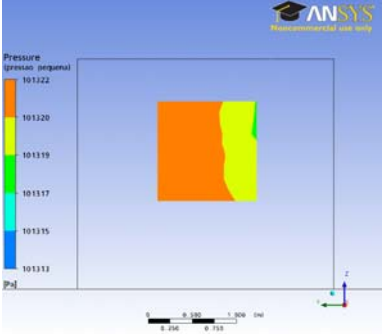
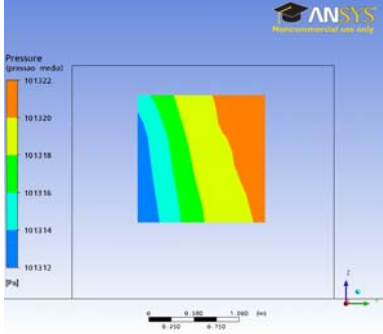
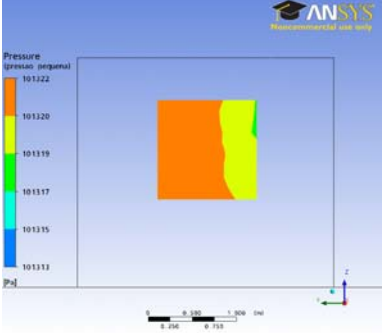
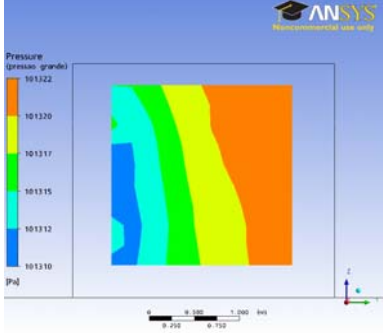
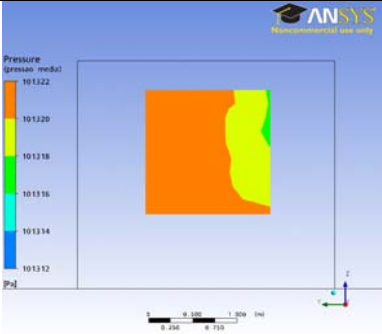
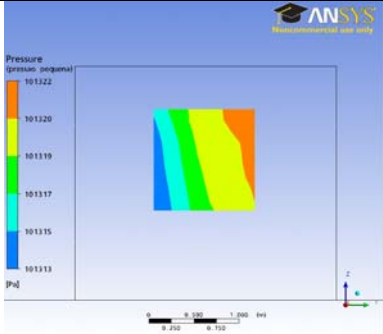
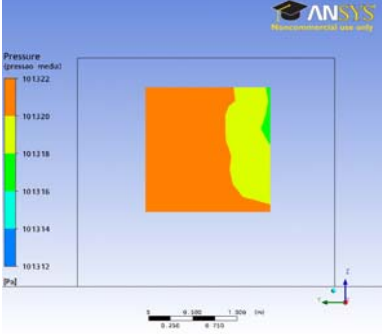
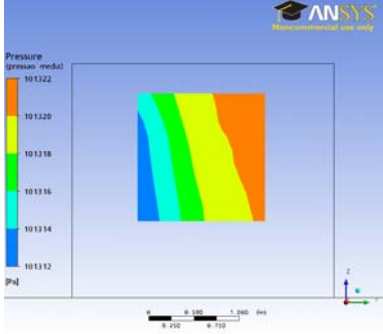
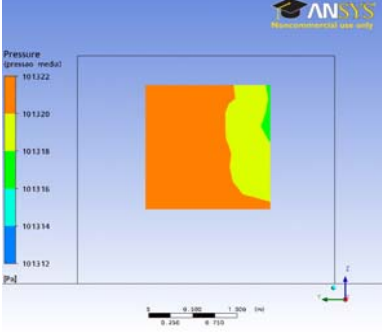
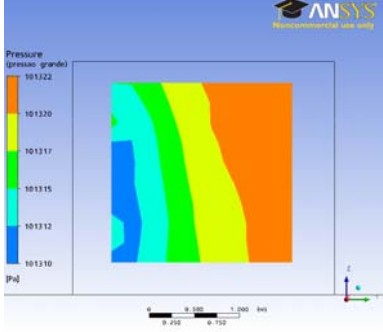
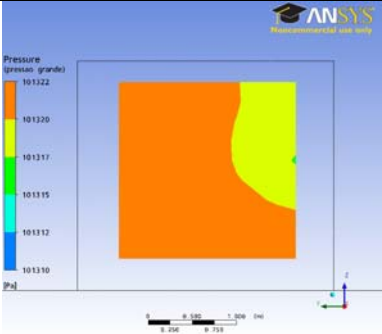
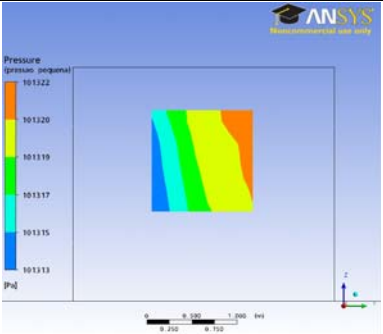
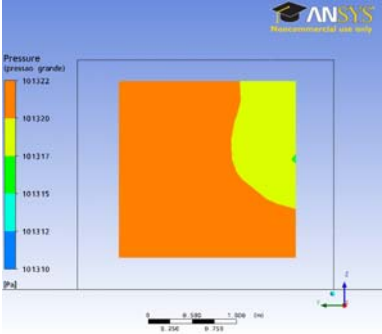
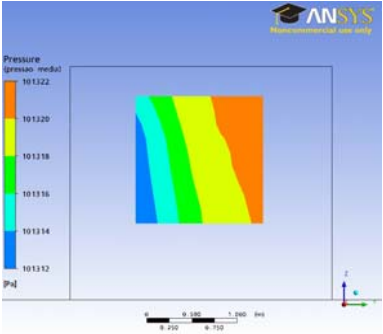
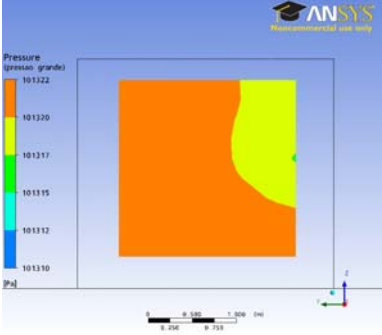
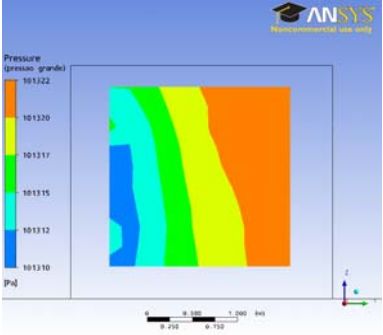



Figura 21 – Pressão externa em corte à 90º

Anexo 3

Quadro resumo das simulações externas e de comparação entre a taxa de renovação simulada e estimada

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
1	Entrada pequena x Saída pequena	0º			101333	101324	266,4	262,1
2	Entrada pequena x Saída média	0º			101333	101324	295,0	290,2
3	Entrada pequena x Saída grande	0º			101333	101324	328,7	323,4

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
4	Entrada média x Saída pequena	0º			101333	101324	295,0	290,2
5	Entrada média x Saída média	0º			101333	101324	335,4	329,9
6	Entrada média x Saída grande	0º			101333	101324	387,7	381,4

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
7	Entrada grande x Saída pequena	0º			101332	101324	309,9	323,4
8	Entrada grande x Saída média	0º			101332	101324	365,5	381,4
9	Entrada grande x Saída grande	0º			101332	101324	448,5	468,0

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
10	Entrada pequena x Saída pequena	15º			101333	101322	289,4	257,5
11	Entrada pequena x Saída média	15º			101333	101322	319,2	284,0
12	Entrada pequena x Saída grande	15º			101333	101322	353,9	314,9

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
13	Entrada média x Saída pequena	15º			101332	101322	306,7	286,3
14	Entrada média x Saída média	15º			101332	101322	347,4	324,2
15	Entrada média x Saída grande	15º			101332	101322	399,2	372,5

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
16	Entrada grande x Saída pequena	15º			101332	101322	343,6	320,7
17	Entrada grande x Saída média	15º			101332	101322	403,9	376,9
18	Entrada grande x Saída grande	15º			101332	101322	492,7	459,8

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
19	Entrada pequena x Saída pequena	30º			101332	101321	272,7	242,6
20	Entrada pequena x Saída média	30º			101332	101321	297,2	264,5
21	Entrada pequena x Saída grande	30º			101332	101321	324,6	288,8

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
22	Entrada média x Saída pequena	30º			101331	101321	292,7	273,1
23	Entrada média x Saída média	30º			101331	101321	327,3	305,5
24	Entrada média x Saída grande	30º			101331	101321	369,6	344,9

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
25	Entrada grande x Saída pequena	30º			101331	101321	333,5	311,2
26	Entrada grande x Saída média	30º			101331	101321	387,7	361,9
27	Entrada grande x Saída grande	30º			101331	101321	464,3	433,3

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
28	Entrada pequena x Saída pequena	45º			101329	101321	205,1	187,7
29	Entrada pequena x Saída média	45º			101329	101321	219,0	200,5
30	Entrada pequena x Saída grande	45º			101329	101321	233,5	213,8

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
31	Entrada média x Saída pequena	45º			101329	101321	236,2	216,2
32	Entrada média x Saída média	45º			101329	101321	258,2	236,3
33	Entrada média x Saída grande	45º			101329	101321	283,0	259,0

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
34	Entrada grande x Saída pequena	45º			101329	101321	278,5	254,9
35	Entrada grande x Saída média	45º			101329	101321	316,7	289,9
36	Entrada grande x Saída grande	45º			101329	101321	366,2	335,2

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
37	Entrada pequena x Saída pequena	60º			101325	101321	112,3	121,9
38	Entrada pequena x Saída média	60º			101325	101321	116,7	126,7
39	Entrada pequena x Saída grande	60º			101325	101321	120,9	131,2

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
40	Entrada média x Saída pequena	60º			101325	101321	133,8	145,2
41	Entrada média x Saída média	60º			101325	101321	141,4	153,5
42	Entrada média x Saída grande	60º			101325	101321	149,1	161,8

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
43	Entrada grande x Saída pequena	60º			101325	101321	167,3	181,5
44	Entrada grande x Saída média	60º			101325	101321	182,9	198,5
45	Entrada grande x Saída grande	60º			101325	101321	200,6	217,7

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
46	Entrada pequena x Saída pequena	75º			101322	101319	54,5	51,9
47	Entrada pequena x Saída média	75º			101322	101319	55,1	52,5
48	Entrada pequena x Saída grande	75º			101322	101319	55,7	53,0

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
49	Entrada média x Saída pequena	75º			101322	101319	67,4	64,1
50	Entrada média x Saída média	75º			101322	101319	68,6	65,3
51	Entrada média x Saída grande	75º			101322	101319	69,7	66,4

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
52	Entrada grande x Saída pequena	75º			101321	101319	74,5	86,9
53	Entrada grande x Saída média	75º			101321	101319	77,1	89,8
54	Entrada grande x Saída grande	75º			101321	101319	79,5	92,6

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
55	Entrada pequena x Saída pequena	90º			101318	101321	0,0	0,0
56	Entrada pequena x Saída média	90º			101318	101321	0,0	0,0
57	Entrada pequena x Saída grande	90º			101318	101321	0,0	0,0

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
58	Entrada média x Saída pequena	90º			101318	101321	0,0	0,0
59	Entrada média x Saída média	90º			101318	101321	0,0	0,0
60	Entrada média x Saída grande	90º			101318	101321	0,0	0,0

Nº	Combinação	θ	Abertura de entrada	Abertura de saída	Pressão média de entrada (Pa)	Pressão média de saída (Pa)	Taxa de renovação Simulada (trocas/h)	Taxa de renovação Estimada (trocas/h)
61	Entrada grande x Saída pequena	90º			101318	101321	0,0	0,0
62	Entrada grande x Saída média	90º			101318	101321	0,0	0,0
63	Entrada grande x Saída grande	90º			101318	101321	0,0	0,0